

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TAMIRES DE ALMEIDA SFEIR

PLANEJAMENTO INTEGRADO DA COLHEITA E DO TRANSPORTE  
FLORESTAL UTILIZANDO RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIA ESPACIAL

CURITIBA

2020

TAMIRES DE ALMEIDA SFEIR

PLANEJAMENTO INTEGRADO DA COLHEITA E DO TRANSPORTE  
FLORESTAL UTILIZANDO RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIA ESPACIAL

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção de título de Doutora, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Co-orientador: Prof. Ph.D José Eduardo Pécora Jr.

Co-orientador: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

CURITIBA

2020

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Sfeir, Tamires de Almeida

Planejamento integrado da colheita e do transporte florestal utilizando  
restrições de adjacência espacial / Tamires de Almeida Sfeir. - Curitiba, 2020.  
158 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientadores: Prof. Ph.D José Eduardo Pécora Jr.

Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências  
Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.  
Defesa: Curitiba, 28/10/2020.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Florestas - Planejamento. 2. Florestas - Manejo. 3. Florestas - Manejo -  
Modelos matemáticos. 4. Florestas - Manejo - Programação linear. 5. Madeira  
- Exploração - Planejamento. 6. Teses. I. Arce, Julio Eduardo. II. Pécora  
Junior, José Eduardo. III. Figueiredo Filho, Afonso. IV. Universidade Federal  
do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.62

Bibliotecária: Marilene do Rocio Veiga – CRB 9/424

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **TAMIRES DE ALMEIDA SFEIR** intitulada: **PLANEJAMENTO INTEGRADO DA COLHEITA E DO TRANSPORTE FLORESTAL UTILIZANDO RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIA ESPACIAL**, sob orientação do Prof. Dr. JULIO EDUARDO ARCE, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Outubro de 2020.

Assinatura Eletrônica

29/10/2020 04:45:18.0

JULIO EDUARDO ARCE

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

02/11/2020 22:37:25.0

LUCAS REZENDE GOMIDE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS)

Assinatura Eletrônica

28/10/2020 21:37:36.0

ALLAN LIBANIO PELISSARI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

29/10/2020 10:19:39.0

LEANDRO MAGATÃO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

28/10/2020 22:14:18.0

ARINEI CARLOS LINDBECK DA SILVA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## DEDICATÓRIA

À minha família, meu refúgio.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, Gisela e Salim. Vocês são meu alicerce, e jamais poderei chegar perto de agradecer todo o amor, incentivo e dedicação que recebi e recebo de vocês. Obrigada por sempre me estimularem a explorar o mundo e acreditarem na educação. Amo vocês.

Agradeço às minhas avós, Ana e Lourdes, por serem um refúgio, para onde vou sempre que preciso de uma dose a mais de amor e tranquilidade.

Meu agradecimento mais doce vai ao meu companheiro de vida, Alexy Viegas, que esteve comigo durante os meus dias mais escuros, acreditou em mim e não me fez desistir. Você me inspira a ser melhor, traz paz ao meu coração e é fonte inesgotável de inspiração acadêmica.

Agradeço também aos meus amigos, que ajudaram a tornar esta caminhada menos árdua. Kellen, Naty, Talita, Vitório e Lina, os maiores presentes que a pós-graduação me trouxe. Obrigada por dividir o peso e a solidão da pesquisa, fazendo os dias mais leves. Mariana e Rodrigo, pelos anos de amizade, madrugadas compartilhadas e histórias escritas juntos. Ana Flávia, por me entender tão bem, partilhar projetos e especialmente, por ter um coração enorme, capaz de abraçar a tudo e a todos. Daniel Asanome, pelas reflexões, conversas e especialmente, pela ajuda no complexo mundo da programação.

E claro, nem uma página deste trabalho seria possível sem a ajuda de meus orientadores e mentores, professor Julio Arce e professor Eduardo Pécora. Vocês são exemplos de vida, pessoal e profissional, que toda pessoa deveria ter a oportunidade de experimentar. Sinto-me extremamente honrada de ter aprendido tanto com vocês. Não existem palavras que demonstrem como sou grata por esse período de orientação.

Muito obrigada, nada aqui escrito é capaz de traduzir o quanto sou grata por ter todos vocês ao meu lado durante este ciclo.

## EPÍGRAFE

“The secret of being a good scientist, I believe, lies not in our brain power. We have enough. We simply need to look at reality and think logically and precisely about what we see. The key ingredient is to have the courage to face inconsistencies between what we see and deduce, and the way things are done.”

Eliyahu M. Goldratt

## RESUMO

Modelos matemáticos são amplamente utilizados para este fim e tiveram um incremento de complexidade em sua formulação ao longo dos anos, a fim de absorver novas demandas da indústria. Entre estas demandas pode-se citar a inclusão de restrições de adjacência, que limitam a área permitida para a colheita em um determinado período, minimizando assim, potenciais impactos ambientais. Uma revisão de literatura sistemática foi realizada para se analisar o estado da arte de publicações que versam sobre as abordagens ARM (*area restriction model*) e URM (*unit restriction model*). A presente pesquisa apresenta um modelo integrado tático e estratégico da colheita e do transporte, incorporando em sua formulação restrições espaciais de adjacência e períodos heterogêneos. O modelo possui um horizonte de planejamento de 15 anos, subdivididos em 7 períodos. Apresenta-se um estudo de caso aplicado a uma área de reflorestamento de *Pinus taeda*, composta por 237 talhões. Vinte e um cenários foram avaliados nesta pesquisa. A implementação do modelo proposto foi realizada na linguagem C++, com a tecnologia Concert® e sua solução obtida pelo solver CPLEX®. A criação das relações de adjacência foi realizada com *software* ArcGis® 10.4.1 Os resultados obtidos pelos testes realizados nesta tese demonstram que, comparando modelos de mesma característica, os cenários incluindo restrições de adjacência apresentam redução mínima do VPL (valor presente líquido) ao serem confrontados com o cenário sem adjacência de seu subgrupo. Para os cenários em que são incluídas as restrições de volume e cuja limitação de área máxima de corte imposta foi de 150 hectares, o comportamento obtido foi muito semelhante aos cenários sem adjacência. Os cenários de adjacência mais restritiva, de 90 hectares, obtiveram redução média de 0,08% em relação aos seus pares sem adjacência, indicando baixo impacto econômico da restrição de adjacência. Ainda sobre os resultados obtidos, a estratégia de se analisar apenas talhões com idade de corte dentro do intervalo permitido para a criação dos clusters viabilizou a resolução dos cenários em um baixo tempo computacional, e fez com que o número de restrições não se elevasse de forma exponencial com o incremento do limite da área máxima de corte.

**Palavras-chave:** Planejamento florestal. Modelo de restrição de área. Planejamento florestal integrado. Programação linear inteira mista.



## ABSTRACT

Mathematical models are widely used for this purpose and have had an increase in complexity in their formulation over the years, to absorb new demands from the industry. Among these demands, we can mention the inclusion of adjacency restrictions, which limit the allowed area for harvesting in a certain period, thus minimizing potential environmental impacts. A systematic literature review was carried out to analyze papers about the subject. This research presents an integrated tactical and strategic model of harvesting and transportation, incorporating spatial adjacency restrictions in its formulation and heterogeneous periods. The model has a planning horizon of 15 years, subdivided into 7 periods, and was applied to a reforestation area of *Pinus taeda*, comprising 237 stands. Twenty-one scenarios were evaluated. The model implementation was made in the C++, with Concert technology and its solution obtained with CPLEX® solver. The creation of the adjacency relations was performed with ArcGis® 10.4.1 software. The results obtained demonstrate that when comparing models of the same characteristic, the scenarios including adjacency restrictions present little variation when compared with the scenario without adjacency of their subgroup. For the scenarios with volume restrictions and whose limitation of the maximum cut area imposed was 150 hectares, the behavior obtained was similar to the scenarios without adjacency. The more restrictive adjacency scenarios, of 90 hectares, obtained an average reduction of 0.08% when compared with the scenario without adjacency of the same subgroups. The strategy of analyzing stands with cutting age within the allowed range for clusters creation enabled a low computational time and made the number of restrictions not increase with the increase of the maximum cutting area limit.

**Keywords:** Forest planning. Area restriction model. Integrated forest planning. Mixed integer linear programming.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1 - SIMPLIFICAÇÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS FLORESTAL DIVERGENTE.....	20
FIGURA 2-1 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE DEFINIÇÃO DA AMOSTRA DE ARTIGOS PARA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	34
FIGURA 2-2 - EVOLUÇÃO DAS PUBLICAÇÕES DA AMOSTRA AO LONGO DOS ANOS. ....	36
FIGURA 2-3 - FREQUÊNCIA ABSOLUTA DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA POR PAÍS NA AMOSTRA. ....	37
FIGURA 2-4 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA FUNÇÃO OBJETIVO DOS PROBLEMAS ABORDADOS. ....	38
FIGURA 2-5 - FREQUÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DOS TIPOS DE RESTRIÇÃO. ....	39
FIGURA 2-6 - O USO DAS RESTRIÇÕES PELO PAÍS DE ORIGEM. ....	40
FIGURA 2-7 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA POR MÉTODO DE RESOLUÇÃO.....	41
FIGURA 2-8 - PRINCIPAIS LOCAIS DE ESTUDO DAS PUBLICAÇÕES DA AMOSTRA.....	42
FIGURA 2-9 - PRINCIPAIS ÁREAS DE PESQUISA ABORDADAS PELOS PERÍODICOS CONTIDOS NA AMOSTRA. ....	45
FIGURA 2-10 - DISTRIBUIÇÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA POR AUTOR. ....	46
FIGURA 2-11 - EVOLUÇÃO DA QUANTIDADE DE CITAÇÕES DAS PUBLICAÇÕES DA AMOSTRA AO LONGO DO TEMPO. ....	47
FIGURA 2-12 - EVOLUÇÃO DAS CITAÇÕES AO LONGO DO TEMPO DAS PUBLICAÇÕES MAIS CITADAS.....	49
FIGURA 2-13 - RELAÇÃO DE CITAÇÃO ENTRE AS PUBLICAÇÕES DA AMOSTRA.....	50
FIGURA 2-14 - REDE DE CITAÇÕES DA PUBLICAÇÃO CONSTANTINO, MARTINS E BORGES (2008). ....	51
FIGURA 2-15 - REDE DE COCITAÇÃO. ....	52
FIGURA 2-16 - - DIAGRAMA DE DENSIDADE DE COCITAÇÃO DE AUTORES. ....	53
FIGURA 2-17 - REDE DE COOCORRÊNCIA DE PALAVRAS-CHAVE.....	54

FIGURA 4-1 - MAPA DA ÁREA DE ESTUDO COM TALHÕES EM DESTAQUE .....	108
Figura 4-2 - ADJACÊNCIAS ENTRE POLÍGONOS .....	111
FIGURA 4-3 – DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE EXECUÇÃO DE UNIÃO DE TALHÕES ADJACENTES.....	112
FIGURA 4-4 – EXEMPLO DE UMA LISTA DE ADJACÊNCIAS.....	114
FIGURA 4-5 – AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA O LSA (a), L90A (b) E L150A (c).....	132
FIGURA 4-6 – VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 1. ....	133
FIGURA 4-7 - AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA O DSA10 (a), D90A10 (b) E D150A10 (c). ....	135
FIGURA 4-8 - VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 2. ....	136
FIGURA 4-9 - AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA O CSA10 (a), C90A10 (b) E C150A10 (c). ....	138
FIGURA 4-10 - VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 3. ....	139
FIGURA 4-11 - AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA DSA15 (a), D90A15 (b) E D150A15 (c).....	140
FIGURA 4-12 - VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 4. ....	141
FIGURA 4-13 - AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA CSA15 (a), C90A15 (b) E C150A15 (c).....	143
FIGURA 4-14 - VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 5. ....	144
FIGURA 4-15 - AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA DSA20 (a), D90A20 (b) E D150A20 (c).....	145
FIGURA 4-16 - VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 6. ....	146
FIGURA 4-17 - AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA O CSA20 (a), C90A20 (b) E C150A20 (c). ....	147
FIGURA 4-18 - VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 7. ....	148

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2-1 - FREQUÊNCIA ABSOLUTA E RELATIVA DE PUBLICAÇÕES POR PERIÓDICO PRESENTES NA AMOSTRA. E SEUS FATORES DE IMPACTO CORRESPONDENTES. ....	44
TABELA 2-2 - AUTORES COM MAIOR NÚMERO DE CITAÇÕES DA AMOSTRA.....	48
TABELA 4-1 – CENÁRIOS AVALIADOS .....	123
TABELA 4-2 – NÚMERO DE RESTRIÇÕES POR CENÁRIO. ....	125
TABELA 4-3 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA OS 21 CENÁRIOS AVALIADOS. ....	126
TABELA 4-4 – COMPARAÇÃO ENTRE O TEMPO DE EXECUÇÃO DOS CENÁRIOS.....	127
TABELA 4-5 – VARIAÇÃO DO VPL ENCONTRADO EM RELAÇÃO AO CENÁRIO LSA E EM RELAÇÃO AOS CENÁRIOS SEM ADJACÊNCIA DOS SUBGRUPOS. ....	128

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	14
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.1.1	Objetivo geral .....	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	REVISÃO DE LITERATURA .....	19
1.3.1	Cadeia de Suprimentos Florestal.....	19
1.3.2	Restrições Espaciais de Adjacência .....	21
1.3.2.1	<i>Unit Restriction Model</i> – URM .....	22
1.3.2.2	<i>Area Restriction Model</i> - ARM .....	23
2	PLANEJAMENTO OTIMIZADO DA COLHEITA FLORESTAL CONSIDERANDO RESTRIÇÕES ESPACIAIS DE ADJACÊNCIA: UMA CONTRIBUIÇÃO BIBLIOMÉTRICA .....	30
2.2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	33
2.2.1	Definição da amostra.....	33
2.3	INDICADORES DE ATIVIDADE .....	36
3	CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DE RESTRIÇÕES AMBIENTAIS DE ADJACÊNCIA NO SETOR FLORESTAL .....	62
4	OTIMIZAÇÃO INTEGRADA DA COLHEITA E DO TRANSPORTE FLORESTAL UTILIZANDO RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIA ESPACIAL ....	104
4.2.1	Área de estudo e descrição do problema .....	107
4.2.2	Restrições de adjacência.....	110
4.2.3	Formulação matemática .....	115
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	122
4.3.1	Testes computacionais .....	122
4.1.1	Descrição dos cenários .....	122
4.1.2	Resultados computacionais.....	124
4.4	CONCLUSÕES .....	149

4.4.1	Recomendações.....	150
	REFERÊNCIAS.....	151
	ANEXO I – LISTA DE ADJACÊNCIAS.....	154

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A madeira, matéria prima de origem florestal, é utilizada pelo homem a milhares de anos. Este material contribui historicamente com as sociedades industriais, satisfazendo suas necessidades. Empregada tradicionalmente para construção, pode ser encontrada também em produtos químicos, na indústria alimentícia, entre outros segmentos. As indústrias de base florestal utilizam a madeira de maneira quase integral. Desde o beneficiamento mecânico de toras, para a construção civil até a produção de fibras, para celulose (BELGACEM; PIZZI, 2016).

Com uma ampla gama de produtos, a indústria florestal possui importância estratégica em diversos países. Segundo Broz et al. (2018), o setor florestal contribui com cerca de 2% a 3% do produto bruto mundial. No Brasil, a contribuição de florestas plantadas no PIB (produto interno bruto) do ano de 2019 foi de 1,2% (IBÁ, 2020). No ano de 2019, o país exportou aproximadamente US\$ 11,3 bilhões em produtos florestais madeireiros, o correspondente a 4,3% do total de exportações nacionais daquele ano e 10% das exportações do agronegócio do Brasil (IBÁ, 2020).

O Brasil apresenta vantagens frente a seus concorrentes neste setor. Em plantios, por exemplo, a produtividade florestal em volume de madeira por hectare ao ano está entre as maiores do mundo (IBÁ, 2020). Entre os anos de 2012 e 2016 o país aumentou suas exportações de fibra celulósica em 52%. Com este resultado o Brasil superou o Canadá em volume total de fibra celulósica exportada, tornando-se o segundo maior exportador mundial (FAO, 2016), e a partir do ano seguinte, 2017, tornou-se o principal exportador de celulose no mundo (IBÁ, 2020). Porém, mesmo apresentando crescimento em determinados mercados e vantagens no desempenho da produtividade florestal, Moreira, Simioni e de Oliveira (2017), apontaram uma tendência de queda da participação global do Brasil na evolução da área de florestas plantadas.

Para superar a concorrência e quedas de desempenho, a indústria de produtos florestais deve atualizar seu modo de fazer negócio. Focando na demanda do cliente enquanto otimiza o uso de seus recursos e coordena suas

atividades (LEHOUX et al., 2012). A fim de racionalizar os bens utilizados pelo setor, sejam estes mão de obra, matéria-prima, tempo, entre outros, é importante entender o funcionamento da cadeia de suprimentos florestal.

A indústria florestal possui uma cadeia de suprimentos divergente, isto é, contém diversas etapas e atores. Entre elas está o manejo florestal, que inclui entre suas decisões o planejamento do sequenciamento da colheita, que tem por objetivo satisfazer a demanda industrial (RÖNNQVIST et al., 2015). Nesta fase, segundo Rönnqvist et al. (2015), também é importante levar em conta os aspectos relacionados as estradas florestais, pois, elas provêm acesso às áreas de colheita e seu custo afeta a viabilidade do planejamento florestal

Para otimizar o planejamento florestal modelos matemáticos podem ser utilizados. Estes modelos geralmente são formulados por meio de programação linear, ou ainda, programação linear inteira, caso variáveis presentes em sua formulação assumam valores inteiros (NASCIMENTO et al., 2012), ambas técnicas da pesquisa operacional. Rönnqvist (2003) citou que o uso da pesquisa operacional para a resolução de problemas florestais ocorre a cerca de 40 anos. Bare et al. (1984) fizeram uma revisão sobre a evolução da utilização da pesquisa operacional, no planejamento florestal desde a década de 1960, contemplando pesquisas sobre manejo de talhões, proteção florestal, aquisição de matéria prima, entre outros. De acordo com Augustynczik, Arce e Silva (2015), os problemas de planejamento da colheita tiveram um aumento no seu nível de complexidade, pois, consideram também em sua formulação relações de adjacência entre os talhões.

Nos anos 1970 houve um aumento da preocupação com relação às questões ambientais relacionadas à colheita florestal (WEINTRAUB, 2007). O primeiro registro de restrições espaciais de adjacência, no âmbito florestal, ocorreu no trabalho de Thompson et al. (1973), em que os autores limitaram a área permitida para colheita em cada par de talhões adjacentes. Grandes áreas colhidas não são esteticamente agradáveis, promovem a erosão do solo por deixá-lo desprotegido, e podem gerar impactos à fauna local (CARVAJAL et al., 2013). A partir deste cenário, alternativas de manejo foram propostas para minimizar danos ambientais causados pela atividade florestal de colheita, dentre



elas os modelos de planejamento utilizando o conceito de área máxima ou adjacência (WEINTRAUB, 2007).

Dentre as formulações para problemas de adjacência duas abordagens merecem destaque, a ARM (*Area Restriction Model*) e a URM (*Unit Restriction Model*). As restrições do tipo URM proíbem que unidades de manejo adjacentes sejam colhidas em um mesmo período do horizonte de planejamento. Esta abordagem considera que a área máxima de colheita é definida pelo tamanho da unidade de manejo sem importar o quão grande ou pequeno é o talhão (KAŠPAR; MARUŠÁK; BETTINGER, 2016). Já a abordagem ARM permite que talhões vizinhos sejam colhidos no mesmo período, desde que a área total colhida não ultrapasse o limite máximo imposto no planejamento (BORGES; BERGSENG; EID, 2014).

Em artigo publicado por Rönqvist et al. (2015), os autores enumeraram 33 problemas em aberto relacionados à indústria florestal e problemas de pesquisa operacional. Dentre os problemas apresentados encontrava-se o desafio de modelar e resolver a colheita florestal integrada ao transporte considerando restrições espaciais e de adjacência. Em meio a este cenário faz-se o seguinte questionamento, de que maneira é possível integrar períodos de diferentes dimensões em um mesmo modelo de planejamento, decisões relacionadas à colheita florestal e ao abastecimento da indústria de forma que não se ultrapasse uma determinada área máxima de colheita, minimizando desta forma possíveis impactos ambientais?

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

A presente tese tem como objetivo geral a otimização do planejamento florestal com integração de decisões relacionadas à colheita, transporte e abastecimento, incorporando em sua formulação restrições espaciais de adjacência.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral desta pesquisa seja alcançado os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- a) Realizar a análise bibliométrica da literatura que versa sobre o uso de restrições de adjacência e posterior aprofundamento de seu estado da arte;
- b) Descrever o cenário encontrado em uma empresa florestal inserida no mercado nacional;
- c) Propor um modelo matemático que incorpore as características do problema de agendamento da colheita florestal para um horizonte tático e estratégico, considerando em sua modelagem custos de transporte, aquisição de madeira de eventuais fornecedores e atendimento da demanda de clientes;
- d) Utilizar um sistema de informações geográficas para a geração de relações de adjacências;
- e) Implementar computacionalmente e aplicar o modelo matemático;
- f) Verificar os efeitos da restrição espacial de adjacência no VPL (Valor Presente Líquido), comparando os resultados obtidos a um modelo sem restrições de adjacência.
- g) Verificar os efeitos da restrição espacial de adjacência no volume de madeira colhido ao longo do horizonte de planejamento avaliado, comparando os resultados obtidos a um modelo sem restrições de adjacência.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente tese é dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo, composto por uma introdução geral ao tema discutido, os objetivos do trabalho, sua estrutura, aqui apresentada, bem como uma breve revisão de literatura sobre os temas centrais da tese, como cadeia de suprimentos florestal e restrições espaciais de adjacência.

O capítulo dois contendo uma revisão sistemática de artigos científicos que dissertam sobre como modelar e resolver o planejamento integrado da colheita e transporte florestal considerando restrições de adjacência do tipo ARM e URM.

O capítulo três que discute os artigos coletados na sessão anterior, com o objetivo de estruturar o arcabouço teórico do tema de pesquisa.

O quarto capítulo traz os resultados obtidos com a implementação do modelo desenvolvido na pesquisa. Por fim, o quinto e último capítulo que apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

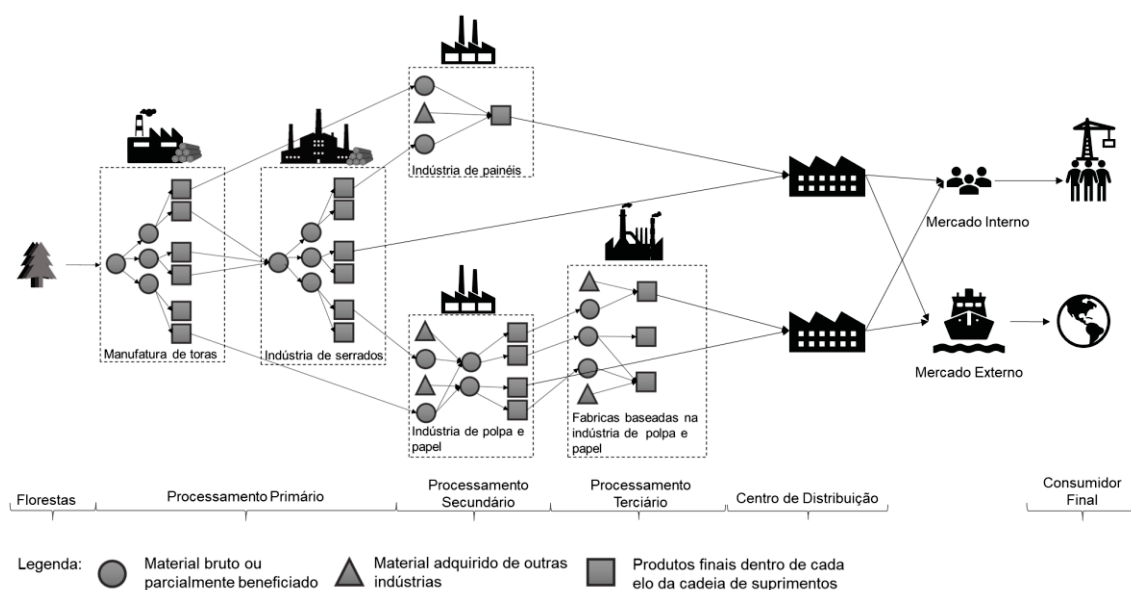
## 1.3 REVISÃO DE LITERATURA

### 1.3.1 Cadeia de Suprimentos Florestal

Cadeias de suprimentos, segundo Gaudreault et al. (2010), podem ser definidas como sistemas integrados, em que, matéria e informações fluem em diversas direções, dentro e através das fronteiras organizacionais. Estes sistemas sincronizam diversos processos interligados para se criar demanda por produtos, comprar insumos necessários para a produção, entre outros. (MIN, 2015). Min (2015) afirmou que o principal objetivo da cadeia de suprimentos é maximizar a eficiência e o lucro das empresas e de seus parceiros. Stadler (2005) disse que o gerenciamento das cadeias de suprimentos visa aumentar a satisfação dos clientes com o menor custo possível para a organização melhorando de forma global a competitividade da cadeia. Este aprimoramento é feito através da integração de suas unidades organizacionais e parceiros, bem como com a organização de seus fluxos de material e informação.

A cadeia de suprimentos de indústrias de base florestal possui estrutura divergente, ou seja, um único produto (neste caso a árvore) transforma-se em diversos itens (MEYR; STADTLER, 2008). A FIGURA 1-1 apresenta um esboço da cadeia de suprimentos florestal, nela o fluxo de materiais corresponde a madeira e seus derivados.

FIGURA 1-1 - SIMPLIFICAÇÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS FLORESTAL DIVERGENTE



FONTE: ADAPTADO DE LEHOUX ET AL. (2012).

Perante este nível de complexidade, torna-se inviável incluir no planejamento da cadeia de suprimentos todos os detalhes encontrados em ambientes reais. Desta forma criam-se modelos a partir da abstração da realidade, os quais são utilizados como base para a definição de estratégias de planejamento (FLEISCHMANN; MEYR; WAGNER, 2008). Fleischmann; Meyr; Wagner (2008) acrescentam que, para simplificar a elaboração de planos e estratégias, é possível decompor a rede completa da cadeia de suprimentos em cadeias menores. Elas são correspondentes aos quatro processos principais – aquisição, produção, distribuição e vendas. Estes quatro elos ainda são subdivididos de acordo com o horizonte de planejamento: níveis estratégico, tático e operacional.

O planejamento estratégico cria condições para o desenvolvimento da cadeia de suprimentos em longo prazo (FLEISCHMANN; MEYR; WAGNER, 2008). Os horizontes de planejamento neste nível variam, geralmente, de cinco anos até o tempo equivalente de rotações de cultura florestal, que podem ter mais de 80 anos cada (D'AMOURS; RÖNNQVIST; WEINTRAUB, 2008). O planejamento florestal estratégico foca, tradicionalmente, na viabilidade econômica da floresta no longo prazo e na estabilidade do abastecimento de madeira, porém questões ambientais e sociais têm se tornado relevantes nesta

etapa de planejamento (BROZ et al., 2018). De forma geral, Broz et al. (2018) complementam que o nível estratégico envolve decisões relacionadas à produção no longo prazo, o uso das terras e o manejo florestal. Ronnqvist (2003) incluiu também decisões referentes ao transporte, como investimento em estradas e gestão estratégica de frotas, além de políticas públicas vinculadas a biodiversidade.

Uma vez que o planejamento de longo prazo é definido, faz-se o planejamento tático, ou de médio prazo, que representa a ligação entre o nível estratégico e o operacional. Esta etapa traduz as decisões feitas no nível mais amplo (longo prazo) em objetivos viáveis operacionalmente (CHURCH, 2007). Segundo Rönqvist (2003), o planejamento tático possui horizontes de planejamento que variam de seis meses a cinco anos. Entre as decisões desta etapa estão o melhoramento de estrada, alocação de equipamentos, plano anual de produção, entre outros. As informações sobre características espaciais e de crescimento do talhão, bem como da demanda a ser atendida, utilizadas neste nível de planejamento são mais precisas para que se tenha um cenário mais exato da floresta (BROZ et al., 2018).

Por fim o planejamento operacional, diferentemente do estratégico e tático, conduz às atividades reais, que irão atender às demandas dos clientes da cadeia de suprimentos (EPSTEIN et al., 2007; BROZ et al., 2018). Seus horizontes de planejamento variam, normalmente, de um dia até seis meses (RONNQVIST, 2003). O objetivo dos planos de curto prazo é especificar o que deve ser feito, onde, e quem é o responsável por aquela tarefa (BROZ et al., 2018). Os modelos deste nível requerem um grau de detalhamento mais alto e exato pois especificam para as atividades instruções detalhadas para execução e controle imediatos (FLEISCHMANN; MEYR; WAGNER, 2008). Dentre as decisões a serem realizadas nesta etapa, citam-se a alocação de equipamentos e equipes de colheita, o sequenciamento da produção nas fábricas, a roteirização para entrega da produção, entre outros. (BROZ et al., 2018).

### 1.3.2 Restrições Espaciais de Adjacência

O primeiro registro de restrições espaciais de adjacência ocorreu no trabalho de Thompson et al. (1973), em que os autores limitaram a área permitida para colheita em cada par de talhões adjacentes. Dentre as diversas estratégias duas abordagens são mais utilizadas, as restrições do tipo URM URM (*Unit Restriction Model*) e restrições ARM URM (*Area Restriction Model*), que estabelecem a área contígua máxima que poderá ser colhida em um mesmo ano do horizonte de planejamento.

Os modelos de colheita considerando restrições de adjacência possuem o conceito de tempo de *green-up* em seus modelos, garantindo um intervalo de tempo mínimo entre colheitas em talhões vizinhos (BORGES; EID; BERGSENG, 2014). Os tempos de exclusão são utilizados geralmente quando um talhão é incapaz de se recuperar em menos de um ano, garantindo que a área colhida tenha se regenerado e não se formem grandes áreas sem cobertura vegetal em períodos próximos (BOSTON; BETTINGER, 2001). Desta forma além de se impedir a colheita de talhões contíguos em um mesmo período, restringe-se também a colheita por um determinado intervalo de tempo de áreas vizinhas à uma já processada.

Segundo Zhu, Bettinger e Li (2007), a diferença entre as abordagens URM e ARM está no fato de que modelos URM controlam o agendamento de talhões vizinhos durante o intervalo de *green-up*, enquanto a formulação ARM permite que áreas adjacentes sejam colhidas dentro deste período contanto que não se exceda o limite de área máximo imposto pelo problema. As seções seguintes descrevem de forma mais detalhada a descrição das abordagens ARM e URM.

#### 1.3.2.1 *Unit Restriction Model* – URM

Segundo Tóth et al. (2013), existem 16 maneiras descritas na literatura de se escrever a formulação URM. Modelos de restrição de unidade (URM), impedem o agendamento da colheita de talhões adjacentes em um mesmo período do horizonte de planejamento, maximizando o lucro obtido com a floresta no final do horizonte de planejamento (BORGES; EID; BERGSENG, 2014). Esta abordagem considera que a área máxima de colheita é definida pelo tamanho

da unidade de manejo, sem importar o quão grande ou pequeno é o talhão (KAŠPAR; MARUŠÁK; BETTINGER, 2016). Na abordagem URM as fronteiras das potenciais áreas selecionadas para a colheita são conhecidas a priori, uma vez que se conhece o polígono formador de cada unidade (BASKENT; KELES, 2005).

Segundo Tóth et al. (2013), o modelo de agendamento de colheita utilizando a abordagem URM pode ser representado por um grafo, em que seus nós correspondem às unidades de manejo e seus arcos são as relações de adjacência entre estas unidades. Considerando que o peso atribuído a um nó é o lucro obtido com o corte do talhão correspondente a ele, logo busca-se encontrar o subconjunto de nós não conectados que retornem o maior peso possível, ou seja, o maior lucro, ao fim do período avaliado. Isto torna a abordagem URM equivalente ao problema SSP (*Maximum Weight Stable Problem*). Esta equivalência possui como implicação o fato de que assim como o SSP, a abordagem URM é *NP-Hard*, isto é, seus tempos de solução tendem a aumentar exponencialmente em função do número de restrições e variáveis do problema (TÓTH et al., 2013).

#### 1.3.2.2 *Area Restriction Model - ARM*

Modelos utilizando a abordagem ARM são uma extensão dos modelos URM. Neles ao invés de se conhecer previamente todos os potenciais clusters para colheita, como ocorre na formulação URM, incorpora-se no problema a formação de agrupamento de talhões, sem que se exceda a área máxima permitida (GOYCOOLEA et al., 2009).

Modelos com restrição de área (ARM) restringem a área total formada por unidades de manejo vizinhas programadas para serem colhidas em um mesmo período, proibindo que se exceda o limite máximo imposto por órgãos ambientais locais, agências certificadoras ou pelos gestores florestais responsáveis (BORGES; EID; BERGSENG, 2014).



Talhões contíguos podem ser unidos em blocos, tornando os modelos ARM mais flexíveis com relação ao período e local da colheita, produzindo, teoricamente, funções objetivo maiores, quando comparadas à modelos URM (KAŠPAR; MARUŠÁK; BETTINGER, 2016).

Inicialmente, considerava-se que problemas utilizando a abordagem ARM eram impossíveis de serem formulados de forma linear e apenas heurísticas ou metaheurísticas poderiam ser utilizadas para sua resolução (TÓTH et al., 2013). No entanto, novas formulações foram propostas utilizando programação inteira para o problema (GOYCOOLEA et al., 2009). Dentre elas três modelos descritos na literatura para problemas com a restrição ARM são mais utilizados: a formulação *Path/Cover*, *Cluster/Generalized Management Units* (GMU) e *Bucket*.

A formulação *Path/Cover*, proposta por McDill, Rebain e Braze (2002), enumera de forma recursiva todos os conjuntos de talhões que excedem a área máxima definida pelo problema, criando restrições para cada uma das infactibilidades identificadas. Esta formulação cria restrições de maneira similar ao problema da mochila (GOYCOOLEA et al., 2009; TÓTH et al., 2013). Isto faz com que a quantidade de restrições do modelo possua natureza exponencial (MARTINS et al., 2014)

A abordagem GMU, ou abordagem *Cluster*, também proposta por McDill, Rebain e Braze (2002), utiliza uma variável para cada bloco formado (*cluster*), cuja área total somada não exceda o valor estabelecido pelo problema. Esta abordagem pode utilizar restrições de adjacência usadas no modelo URM, uma vez que os potenciais *clusters* devem ser conhecidos antes da construção do modelo (TÓTH et al., 2013). Diferentemente da formulação *Path*, que possui uma quantidade exponencial de restrições, a abordagem *Cluster* gera uma quantidade exponencial de variáveis ao problema.

Por fim, a formulação *Bucket*, desenvolvida por Constantino, Martins e Borges (2008). Esta formulação baseia-se na definição de *buckets* a-priori, em que cada talhão *i* é alocado em apenas um *bucket*. Talhões designados para um mesmo *bucket* devem ser vizinhos, caso contrário divide-se o agrupamento mantendo apenas os talhões vizinhos, a soma de suas áreas não deve

ultrapassar o limite determinado no modelo. Os *buckets* agendados para a colheita não poderão ser adjacentes (GOYCOOLEA et al., 2009). Nesta formulação o número de variáveis e restrições é polinomial (MARTINS et al., 2014).

## REFERÊNCIAS

- AUGUSTYNICZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. da. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 649-656, 2015. doi: <https://doi.org/10.1590/01047760201521042006>
- BARE, B. B. et al. A survey of systems analysis models in forestry and the forest products industries. **European Journal of Operational Research**. Vol. 18, n.1, pp. 1-18, 1984. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(84\)90255-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(84)90255-8)
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological modelling**, v. 188, n. 2-4, p. 145-173, 2005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.059>
- BELGACEM, M. N.; PIZZI, A. (Ed.). **Lignocellulosic Fibers and Wood Handbook: Renewable Materials for Today's Environment**. John Wiley & Sons, 2016.
- BORGES, P.; BERGSENG, E.; EID, T. Adjacency constraints in forestry-a simulated annealing approach comparing different candidate solution generators. **Mathematical & Computational Forestry & Natural Resource Sciences**, v. 6, n. 1, 2014.
- BORGES, P.; EID, T.; BERGSENG, E. Applying simulated annealing using different methods for the neighborhood search in forest planning problems. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 3, p. 700-710, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.039>
- BOSTON, K.; BETTINGER, P. The economic impact of green-up constraints in the southeastern United States. **Forest Ecology and Management**, v. 145, n. 3, p. 191-202, 2001. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00417-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00417-5)
- BROZ, D. et al. The Argentinian forest sector: opportunities and challenges in supply chain management. **Uncertain Supply Chain Management**, pp. 375-392, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.5267/j.uscm.2018.1.001>

CARVAJAL, R. et al. Imposing connectivity constraints in forest planning models. **Operations Research**, v. 61, n. 4, p. 824-836, 2013. doi: <https://doi.org/10.1287/opre.2013.1183>

CHURCH, R. L. Tactical-level forest management models. In: **Handbook of operations research in natural resources**. Springer, Boston, MA, 2007. p. 343-363.

CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; BORGES, J. G. A new mixed-integer programming model for harvest scheduling subject to maximum area restrictions. **Operations Research**, v. 56, n. 3, p. 542-551, 2008. doi: <https://doi.org/10.1287/opre.1070.0472>

D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 46, n. 4, p. 265-281, 2008. doi: <https://doi.org/10.3138/infor.46.4.265>

EPSTEIN, R. et al. Harvest operational models in forestry. In: **Handbook of operations research in natural resources**. Springer, Boston, MA, 2007. p. 365-377.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global forest products facts and figures**, s.l.: s.n. 2016.

FLEISCHMANN, B.; MEYER, H.; WAGNER, M. Advanced planning. In: **Supply chain management and advanced planning**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 81-106, 2008.

GAUDREAU, J. et al. Distributed operations planning in the lumber supply chain: Models and coordination. **International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice**, v. 17, n. 3, p. 168-189, 2010.

GOYCOOLEA, M. et al. Evaluating approaches for solving the area restriction model in harvest scheduling. **Forest Science**, v. 55, n. 2, p. 149-165, 2009. doi: <https://doi.org/10.1093/forestscience/55.2.149>

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual**, s.l.: s.n. 2020

KAŠPAR, J.; MARUŠÁK, R.; BETTINGER, P. Time efficiency of selected types of adjacency constraints in solving unit restriction models. **Forests**, v. 7, n. 5, p. 102, 2016. doi: <https://doi.org/10.3390/f7050102>

LEHOUX, N. et al. The value creation network of Canadian wood fibre. **Interuniversity Research Center on Enterprise Networks, Logistics and Transportation. Scientific Report CirreIt**. 210, 2012.

MARTINS, I. et al. Modeling target volume flows in forest harvest scheduling subject to maximum area restrictions. **Top**, v. 22, n. 1, p. 343-362, 2014. doi: <https://doi.org/10.1007/s11750-012-0260-x>

MCDILL, M. E.; REBAIN, S. A.; BRAZE, J. Harvest scheduling with area-based adjacency constraints. **Forest Science**, v. 48, n. 4, p. 631-642, 2002. doi: <https://doi.org/10.1093/forestscience/48.4.631>

MEYR, H.; STADTLER, H. Types of Supply Chains. In: **Supply Chain Management and Advanced Planning**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 65-80, 2008.

MIN, H. Principles of Supply Chain Management. In: **The essentials of supply chain management: New business concepts and applications**. Pearson Education LTD, p. 468, 2015.

MOREIRA, J. M. M. Á. P.; SIMIONI, F. J.; DE OLIVEIRA, E. B. Importância e desempenho das florestas plantadas no contexto do agronegócio brasileiro. **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 85-94, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v47i1.47687>

NASCIMENTO, F.A. F. et al. Uso da meta-heurística otimização por enxame de partículas no planejamento florestal. **Scientia Florestalis**. Vol. 40, n.96, pp. 557-565, 2012.

RÖNNQVIST, M. et al. Operations research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 11-40, 2015. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1907-4>

RÖNNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical programming**, v. 97, n. 1-2, p. 267-284, 2003. doi: <https://doi.org/10.1007/s10107-003-0444-0>

STADTLER, H. Supply Chain management and advanced planning - basics, overview and challenges. **European Journal of Operational Research**, v. 163, n.3, p. 575-588, 2005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.03.001>

THOMPSON, E. F. et al. Integrating timber and wildlife management planning. **The Forestry Chronicle**, v. 49, n. 6, p. 247-250, 1973.

TÓTH, S. F. et al. Testing the use of lazy constraints in solving area-based adjacency formulations of harvest scheduling models. **Forest Science**, v. 59, n. 2, p. 157-176, 2013. doi: <https://doi.org/10.5849/forsci.11-040>

WEINTRAUB, A. Integer programming in forestry. **Annals of Operations Research**, v. 149, n. 1, p. 209-216, 2007.

ZHU, J.; BETTINGER, P.; LI, R. Additional insight into the performance of a new heuristic for solving spatially constrained forest planning problems. **Silva Fennica**, v. 41, n. 4, p. 687, 2007.

## 2 PLANEJAMENTO OTIMIZADO DA COLHEITA FLORESTAL CONSIDERANDO RESTRIÇÕES ESPACIAIS DE ADJACÊNCIA: UMA CONTRIBUIÇÃO BIBLIOMÉTRICA

### RESUMO

Uma das principais etapas no planejamento florestal é a elaboração do plano de colheita. Com o crescente interesse em aspectos ambientais a utilização de modelos com restrições espaciais de adjacência tem aumentado. Desta forma, este estudo consiste em apresentar uma contribuição bibliométrica dos trabalhos que versam sobre o planejamento otimizado da colheita florestal utilizando restrições espaciais de adjacência do tipo ARM (*Area Restriction Model*) e URM (*Unit Restriction Model*). Identificando os principais países responsáveis pelas publicações, os principais métodos de resolução empregados, as funções objetivo de maior interesse na formulação do problema, bem como, redes de citação, cocitação e coocorrência de palavras. Gerando desta forma um maior entendimento sobre o tema. A pesquisa foi realizada como uma revisão sistemática, apoiada em técnicas bibliométricas, por meio de consulta à base ISI *Web of Science*, e seu tratamento pelos *softwares* VOSviewer e CitNetExplorer. Um total de 44 artigos publicados entre 2008 e 2018 foram analisados. Grande parte das pesquisas avaliadas utilizou a abordagem ARM para a modelagem de seus planos de colheita considerando restrições espaciais de adjacência. Métodos heurísticos, como a metaheurística *simulated annealing*, foram as principais alternativas de resolução encontradas para contornar a grande demanda de tempo e de processamento computacional, geradas pela natureza complexa do problema.

**Palavras-chave:** Planejamento da colheita, Modelo de restrição de adjacência, Revisão bibliométrica, Pesquisa operacional, Manejo florestal.

### ABSTRACT

One of the main stages in forest industry is harvest planning. The use of spatial adjacency constraints has increased in harvest planning models due to the growing interest in environmental aspects. Therefore, the aim of this study was to make a bibliometric analysis of scientific articles that have as their scope the

optimized forest harvest planning using ARM (Area Restriction Model) and URM (Unit Restriction Model) spatial adjacency constraints. We identified the main countries of origin of the papers, the main resolution methods employed, the most used objective function in the formulation of the problem, as well as, the citation, the co-citation and co-occurrence of word's networks, thus generating a greater understanding on the subject. The research was conducted as a systematic review, supported by bibliometric techniques. The ISI Web of Science database was consulted, and the data was processed with VOSviewer and CitNetExplorer softwares. A total of 44 articles published between 2008 and 2018 were analyzed. Most of the papers uses the ARM approach to model the harvest plan considering spatial adjacency constraints. Heuristic methods, such as simulated annealing, were the main resolution alternatives found to circumvent the time and computational processing demands caused by the complex nature of the problem.

**Keywords:** Harvest planning, Adjacency restriction model, Bibliometric review, Operation Research, Forest management.



## 2.1 INTRODUÇÃO

As indústrias de base florestal utilizam a madeira de maneira quase integral. Desde o beneficiamento mecânico de toras, para a construção civil até a produção de fibras, para celulose (BELGACEM; PIZZI, 2016). Com uma gama tão ampla de utilização, esta indústria possui importância estratégica em diversos países. Este protagonismo na matriz econômica de diferentes países aumentou o nível de complexidade do planejamento florestal para que este se torne mais fiel aos cenários encontrados pelos gestores florestais e incorporasse novas demandas de mercado, como por exemplo a inclusão de relações espaciais de adjacência entre talhões (AUGUSTYNCZIK et al., 2015).

O primeiro registro do uso de restrições de relação de vizinhança no ambiente florestal ocorreu no trabalho de Thompson et al. (1973), em que os autores restringem a área permitida de colheita em cada par de talhões adjacentes. Existem diversas formas de se descrever relação de adjacência entre talhões, dentre elas duas merecem destaque, a ARM (*Area Restriction Model*) e a URM (*Unit Restriction Model*). A restrição do tipo URM proíbe que talhões vizinhos sejam colhidos em um mesmo período do horizonte de planejamento, sem considerar sua dimensão, pois considera que a área máxima de colheita é definida pelo tamanho dos talhões (KAŠPAR; MARUŠÁK; BETTINGER, 2016). Já a abordagem ARM permite que talhões vizinhos sejam colhidos no mesmo período, uma vez que a soma de suas áreas não ultrapasse o limite máximo imposto no planejamento (BORGES.; BERGSENG; EID, 2014).

Diante do exposto, o objetivo geral deste estudo consiste em apresentar uma contribuição bibliométrica de trabalhos que abordam o planejamento otimizado da colheita florestal utilizando restrições espaciais de adjacência do tipo ARM e URM. Além disto faz-se um diagnóstico destes trabalhos, tendo como objetivos específicos a identificação dos principais países responsáveis pelas publicações, os principais métodos de resolução empregados, as funções objetivo de maior interesse na formulação do problema, análises de citação e redes de citação, cocitação e coocorrência de palavras. Gerando a partir destas análises um maior entendimento sobre o tema.

## 2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Glänzel (2003) a expressão bibliometria foi apresentada no ano de 1969, como termo que explica a aplicação de métodos matemáticos e estatísticos em diversos meios de comunicação. Para Endler (2016) a bibliometria pode ser aplicada em diferentes áreas com o objetivo de avaliar as tendências de uma área, investigando os atributos das publicações, como principais temas estudados, autoria, origem dos estudos etc.

Segundo Santos (2015) existem duas categorias de indicadores bibliométricos, indicadores de atividade e de relação. Ainda de acordo com o autor, o primeiro grupo fornece informação sobre o impacto das atividades de pesquisa e seu volume. Entre estes indicadores citam-se as contagens de publicações e a de citações, ou seja, o número de trabalhos que fazem referência à um determinado artigo. A partir deste indicador é possível inferir que uma publicação produz impacto na geração de conhecimento do tema da pesquisa. Os indicadores de coocorrência, ou relação, buscam colaborações e laços entre autores e campos de pesquisa (SANTOS, 2015). Estes critérios são geralmente representados por redes sociais de relacionamento. São indicadores de relação: a cocitação, a coautoria e a coocorrência de palavras.

A análise bibliométrica dos dados coletados é realizada nas sessões seguintes com a definição da amostra, seguida pelos indicadores de atividades, realizados por meio da descrição estatística dos registros, utilizando o *software* Microsoft Excel®. Após a investigação exploratória dos dados, fez-se a análise das redes de relacionamento dos artigos com o programa VOSviewer® versão 1.6.13 (VAN ECK; WALTMAN, 2019) e a ferramenta CitNetExplorer® versão 1.0.0. (VAN ECK; WALTMAN, 2014).

### 2.2.1 Definição da amostra

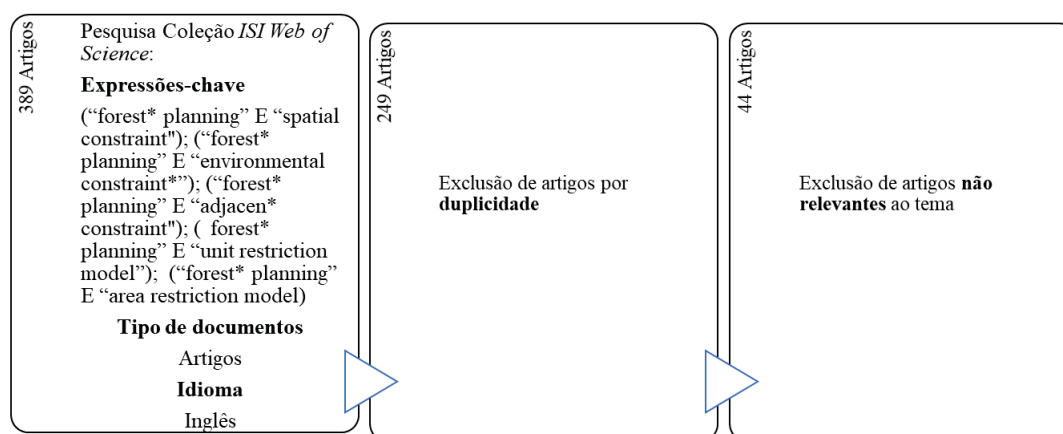
O período de análise foi fixado entre os anos de 2008 e 2018. Este intervalo foi escolhido para incluir uma quantidade relevante de trabalhos,

representando desta maneira o estado da arte da literatura, porém sem tornar impraticável analisar todos os artigos selecionados.

Para a seleção da amostra para análise bibliométrica, decidiu-se limitar a busca por artigos publicados em revistas científicas, disponíveis digitalmente e redigidos na língua inglesa. Livros, teses, dissertações e artigos de congressos e eventos foram excluídos. Quanto à base de dados, fez-se a opção de utilizar a plataforma *ISI Web of Science* para a realização da pesquisa. Esta base foi selecionada por oferecer um conjunto de dados relevantes para a análise bibliométrica da amostra, como lista de autores, fator de impacto (FI) das revistas calculado pelo *Journal Citation Reports* (JCR), entre outros (CARVALHO et al., 2013).

Cinco pesquisas foram feitas na base de dados. Buscou-se as expressões-chave selecionadas nos títulos, resumos e/ou palavras-chave dos artigos. O caractere curinga “\*” foi utilizado para que a busca retornasse artigos que incluíssem tanto o termo “*constraint*” quanto “*constraints*”, “*forest*” e suas variantes como *forestry* ou *forests*, entre outros. A Figura 2-1 apresenta a sequência de pesquisa bem como as expressões-chave definidas pela autora.

FIGURA 2-1 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE DEFINIÇÃO DA AMOSTRA DE ARTIGOS PARA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.



FONTE: A AUTORA (2020).

A pesquisa inicial resultou em um total de 389 trabalhos. Após a eliminação dos itens duplicados a amostra foi reduzida a 249 artigos. Para a seleção da amostra final desta pesquisa fez-se a leitura dos resumos destes

artigos a fim de identificar os trabalhos que pertencessem ao escopo definido, resultando, desta forma, em uma amostra final contendo 44 artigos.

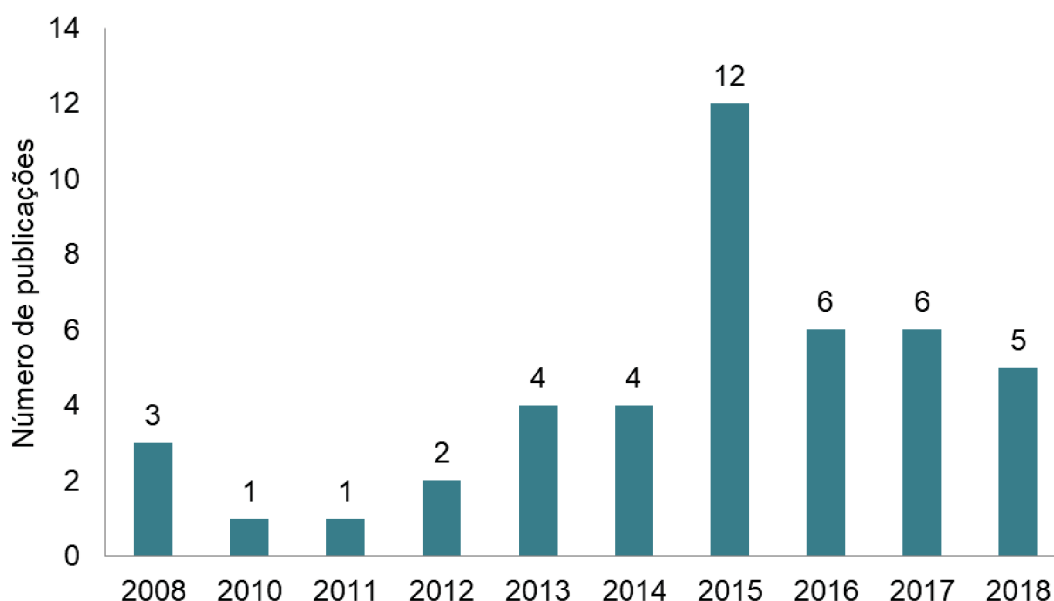
### 2.2.2 Compilação dos dados

Após a definição da base de dados, registraram-se as seguintes informações dos artigos selecionados: ano de publicação; nome da revista e seu fator de impacto referente à 2018; local de publicação (país); região onde o estudo foi executado (país) caso aplicável; tipo de restrição utilizada; função objetivo utilizada pelo problema; método de resolução e número de citações da publicação.

## 2.3 INDICADORES DE ATIVIDADE

A primeira análise realizada foi a identificação de tendências de crescimento, ou de redução no interesse de desenvolvimento de estudos relacionados ao planejamento da colheita florestal com o uso de restrições de adjacência. Para isso fez-se a compilação dos artigos de acordo com o ano de publicação (Figura 2.2). Os primeiros anos analisados possuem uma menor quantidade no número de publicações, inclusive com a ausência de publicações no ano de 2009, omitido do gráfico. Observou-se, em seguida, um aumento no volume de trabalhos publicados. O pico de publicações ocorreu no ano de 2015 com um total de 12 artigos. Os anos seguintes ao registro máximo mantiveram a média de publicações acima dos anos iniciais, indicando o interesse constante no assunto.

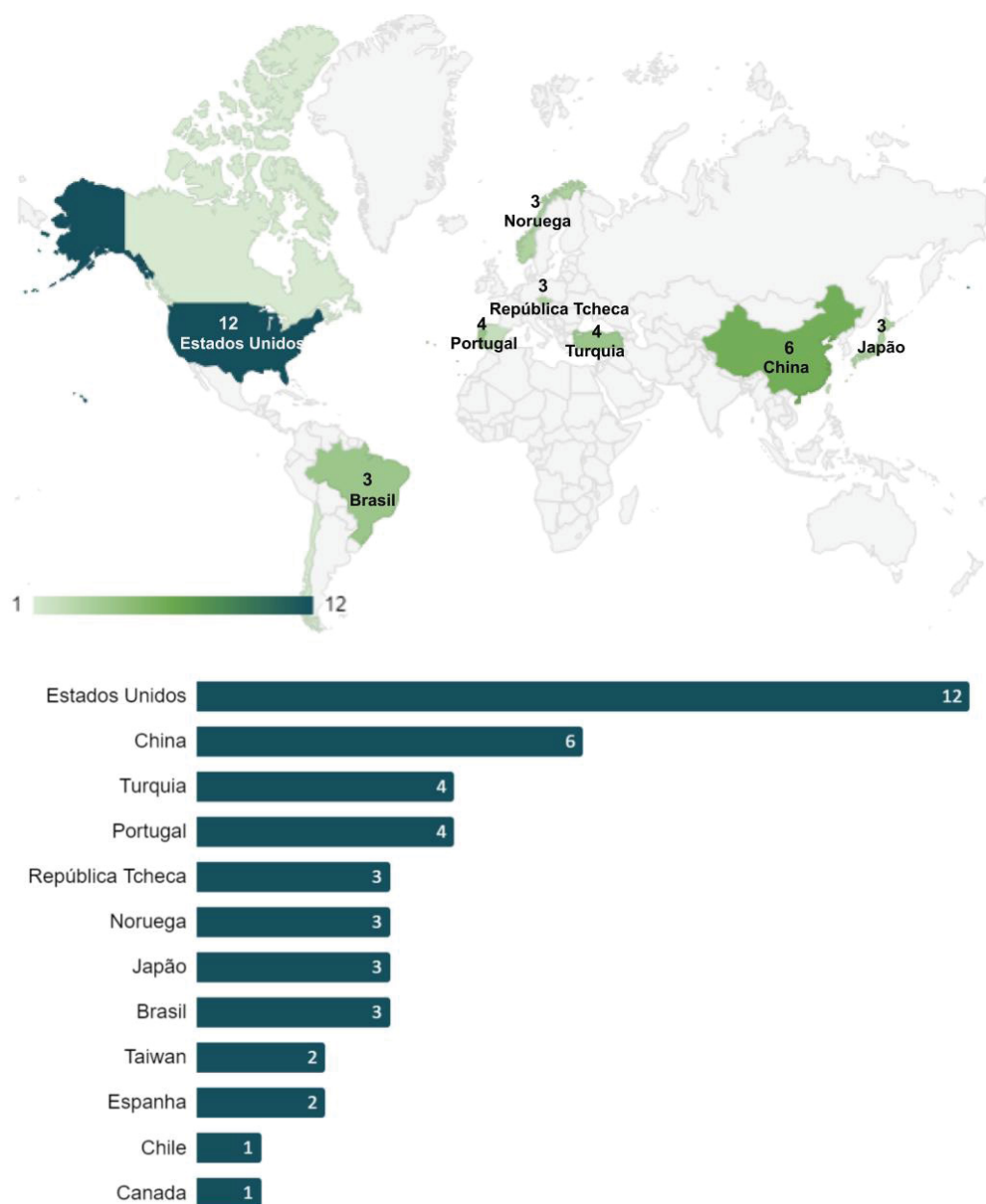
FIGURA 2-2 - EVOLUÇÃO DAS PUBLICAÇÕES DA AMOSTRA AO LONGO DOS ANOS.



FONTE: A AUTORA (2020).

Com relação à distribuição das publicações por país de origem foram identificados artigos com origem nos continentes americano, europeu e asiático. Observou-se o predomínio dos Estados Unidos, com o total de 12 publicações, o dobro em relação ao segundo lugar, China, com seis publicações. Destacaram-se também Portugal e Turquia, com quatro artigos cada, e Brasil, Noruega, República Tcheca e Japão com três publicações (Figura 2.3).

FIGURA 2-3 - FREQUÊNCIA ABSOLUTA DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA POR PAÍS NA AMOSTRA.

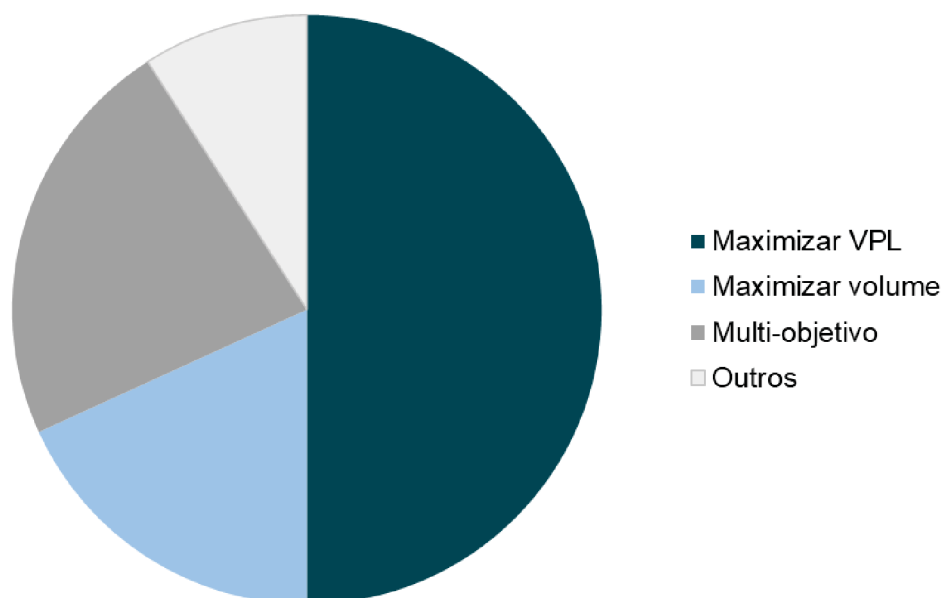


FONTE: A AUTORA (2020).

A Figura 2-4 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** contém a distribuição de frequência das funções objetivo dos problemas apresentados pelas publicações da amostra. Segundo Marins (2011), a função objetivo é a tradução matemática, em função das variáveis do problema, do objetivo que se pretende atingir com a resolução do modelo proposto. Metade dos artigos avaliados, ou seja, 22 publicações, tiveram por objetivo maximizar o valor presente líquido (VPL) da colheita ao final do horizonte de planejamento (HP). A

formulação de modelos complexos, que consideram multiobjetivos em sua formulação tem ganhado destaque, com 22,7% dos artigos incorporando mais de um objetivo em seu modelo. Como exemplo de função multiobjetivo cita-se o trabalho desenvolvido por Dong, Lu e Liu (2018), que teve por objetivo maximizar o VPL da produção de madeira e do sequestro de carbono, e o artigo publicado por Wei e Murray (2015), que apresentou dois modelos multiobjetivos, ambos com restrições URM, que visam entender os efeitos da incerteza espacial na colheita florestal. A maximização do volume colhido foi outro objetivo comum encontrado em problemas de colheita florestal, sendo este o foco de 18,2% dos artigos.

FIGURA 2-4 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA FUNÇÃO OBJETIVO DOS PROBLEMAS ABORDADOS.

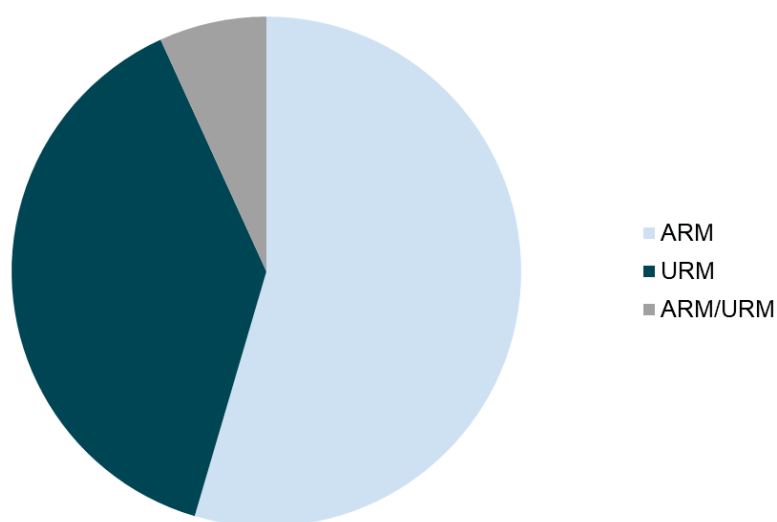


FONTE: A AUTORA (2020).

Observando a frequência de utilização das restrições ARM e URM pelos artigos que compõem a amostra (Figura 2-5), verificou-se a predominância dos problemas formulados com a abordagem ARM, uma vez que, apesar de possuir uma maior demanda da capacidade computacional em relação aos modelos URM, esta formulação torna os modelos mais flexíveis. As publicações que fazem uso de restrições ARM corresponderam à 54,5% do total, enquanto aqueles que utilizaram a abordagem URM contemplaram aproximadamente 38% dos artigos publicados. Embora a maioria das pesquisas tenha escolhido trabalhar com apenas uma das abordagens, 6,8% dos artigos compararam os

efeitos das duas restrições em seus estudos, como o artigo de Dong et al. (2016) que avaliou técnicas de busca do algoritmo *simulated annealing* (SA) na resolução problemas espaciais de agendamento de colheita, utilizando na formulação de seus modelos as abordagens ARM e URM, ambas com tempo de *green-up* de 3 anos.

FIGURA 2-5 - FREQUÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DOS TIPOS DE RESTRIÇÃO.

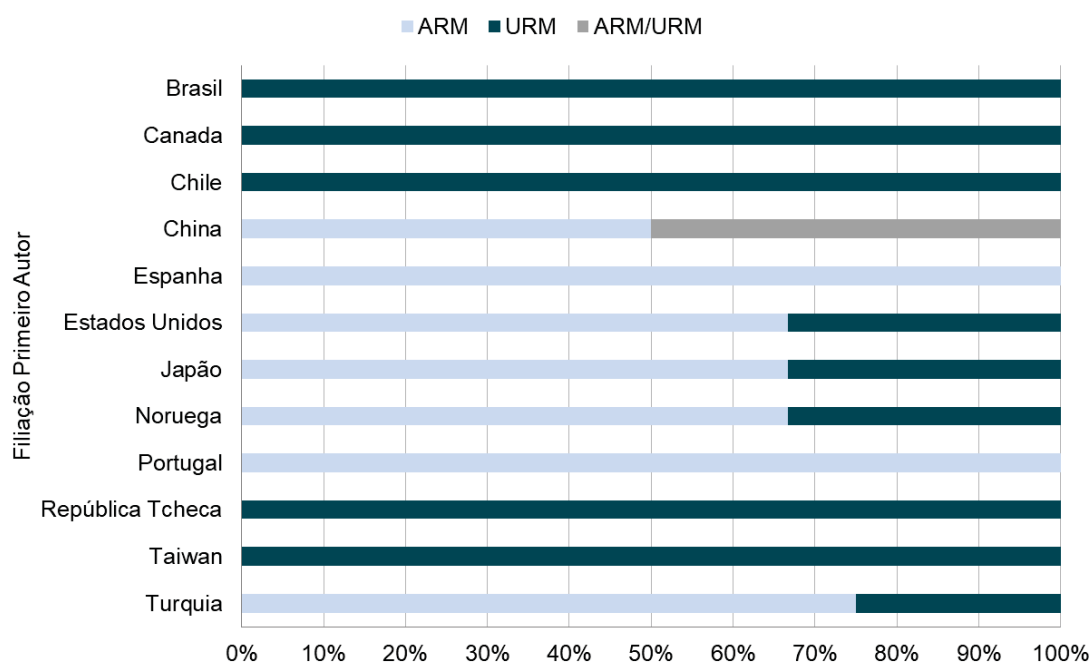


FONTE: A AUTORA (2020).

Quando se analisa o uso das restrições pelo país de origem (Figura 2-6), observa-se que grande parte deles também utiliza com maior frequência a restrição do tipo ARM. Os estudos realizados na China mostram que metade das pesquisas realizadas no país utilizam unicamente a restrição ARM, enquanto os demais 50% fazem uso tanto da formulação ARM quanto da URM. Nas publicações com origem nos Estados Unidos existe a preferência pelo uso da abordagem ARM na elaboração das estratégias de colheita florestal, com 8 artigos do total de 12 utilizando a restrição de área. Portugal, que possui quatro artigos no total, utiliza a restrição de unidade (URM) em todas as publicações. O Brasil também utiliza este tipo de restrição em 100% dos casos. Canadá e Chile também apresentam a dominância da restrição do tipo URM, porém ambos os países possuem apenas um artigo na amostra, o que não possibilita concluir se existe um maior interesse em modelos que utilizam este tipo de restrição.



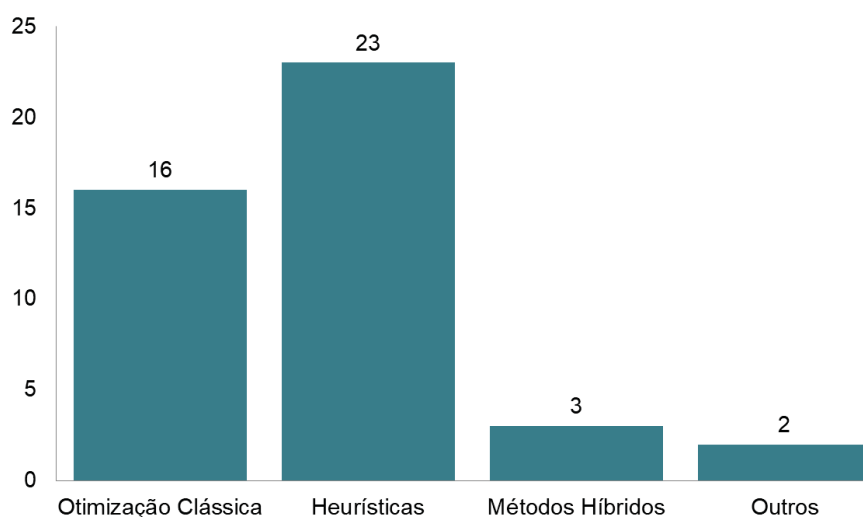
FIGURA 2-6 - O USO DAS RESTRIÇÕES PELO PAÍS DE ORIGEM.



FONTE: A AUTORA (2020)

A Figura 2-7 apresenta a distribuição de frequência absoluta dos métodos de resolução utilizados pelos autores nas publicações analisadas. Quatro grandes grupos foram propostos: (1) otimização clássica, que contempla métodos exatos de otimização; (2) heurísticas, que abrange tanto heurísticas quanto metaheurísticas, como por exemplo a busca tabu; (3) método híbrido, em que os autores utilizaram uma combinação de técnicas, como por exemplo, métodos exatos e heurísticos; e por fim, (4) outros, que inclui diferentes métodos, como a simulação.

FIGURA 2-7 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA POR MÉTODO DE RESOLUÇÃO.



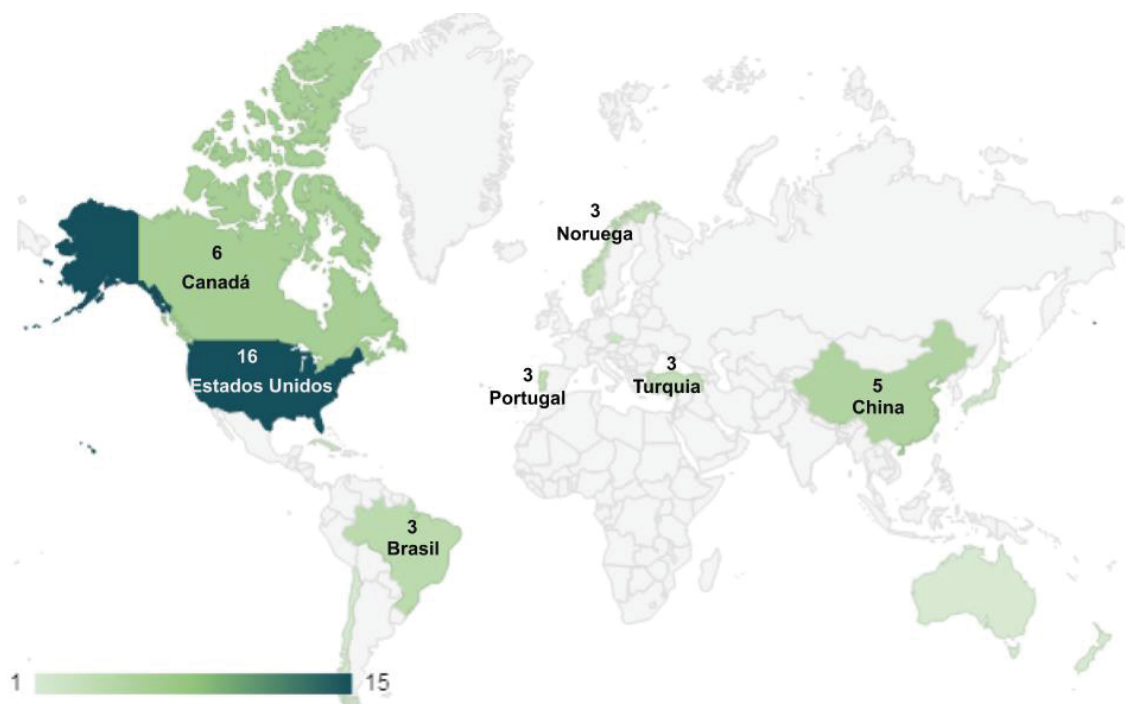
FONTE: A AUTORA (2020).

O problema de agendamento de colheita florestal com restrições de adjacência é do tipo *NP-Hard* (TÓTH et al., 2013). Problemas desta natureza tem seus tempos de solução crescendo exponencialmente em função do número de restrições e variáveis do problema, tornando o tempo de resolução por métodos exatos muito longos em grande parte das vezes. Logo, observou-se que os métodos heurísticos se destacam frente aos demais, sendo seguido pelos métodos de otimização clássica. Dentre os métodos heurísticos a metaheurística SA foi a de maior relevância, sendo utilizada por 7 artigos cujo método de resolução foi heurístico (BORGES; EID; BERGSENG, 2014; BACHMATIUK; GARCIA-GONZALO; BORGES, 2015; DONG et al., 2015a; DONG et al., 2016; QIN; DONG; HUANG, 2017; DONG; LU; LIU, 2018; DONG et al., 2018) e em um artigo com método de resolução híbrido. O artigo de Cyr et al. (2017) utilizou o algoritmo SA para encontrar o melhor cronograma de colheita das áreas e o método exato, aplicado após a metaheurística, para maximizar o volume colhido de madeira.

A Figura 2-8 apresenta os locais de aplicação das pesquisas desenvolvidas nos artigos. Desta forma, pode-se identificar áreas de interesse para o desenvolvimento de pesquisa e se existiu um deslocamento entre origem e aplicação. É importante ressaltar que o somatório total de locais aplicados superou o número de artigos pois, em alguns casos, mais de um local de estudo foi utilizado.

Ao se avaliar as áreas de interesse para as pesquisas desenvolvidas nos artigos, a distribuição geográfica se alterou quando comparada à Figura 2-3. Enquanto o Canadá não figurava entre os principais locais de origem das publicações, possuindo apenas um artigo com origem no país, seis trabalhos utilizaram florestas canadenses como base de estudo (STRIMBU; INNES; STRIMBU, 2010; KÖNNYU; TÓTH, 2013; MCDILL et al., 2016; NETO et al., 2017; CYR et al., 2017; YOSHIMOTO; ASANTE, 2018). Os Estados Unidos também tiveram aumento no número de trabalhos relacionados, corroborando a importância do tema para o país. O Brasil se manteve com três trabalhos, todos os artigos com origem no país foram pesquisas dedicadas às florestas locais. China, Turquia e Portugal tiveram a redução de uma unidade no total de publicações, indicando que autores filiados a estes países realizaram pesquisas voltadas à outras regiões. Como exemplo tem-se o artigo de Akbulut et al. (2017) cujo primeiro autor é filiado ao Instituto de Pesquisa Florestal do Sudoeste de Anatólia, na Turquia, e em sua publicação teve por objetivo avaliar se o uso soluções iniciais em heurísticas com soluções geradas por um modelo de programação linear relaxada, levaria a melhores planos de manejo para florestas localizadas no estado de Oregon, nos Estados Unidos.

FIGURA 2-8 - PRINCIPAIS LOCAIS DE ESTUDO DAS PUBLICAÇÕES DA AMOSTRA.



FONTE: A AUTORA (2020).

Os 44 artigos avaliados foram publicados em 25 revistas únicas. Destas, quatro delas representaram 40% de todas as publicações (Tabela 1). Os periódicos *Silva Fennica*, *Forests*, *Forest Science* e *Forest Policy and Economics* somaram ao todo 18 artigos. Em contraste, 18 revistas possuem apenas uma publicação na amostra. A Tabela 1 inclui também o fator de impacto (FI) para o ano de 2018, fornecido pelo JCR, dos periódicos. O FI permite comparar e avaliar a importância de periódicos em uma área específica (ENDLER et al., 2015). O cálculo do FI é feito pela divisão das citações recebidas de um periódico no ano avaliado, em artigos publicados nos dois anos anteriores, pelo número de artigos publicados no periódico e aptos a receberem citações nos anos anteriores computados. Logo, para o ano de 2018 o cálculo do fator de impacto é a razão do número de citações recebidas pelos artigos publicados nos anos de 2016 e 2017, pelo total de artigos publicados nestes anos.

Os periódicos de maior FI são a *Environmental Modeling & Software*, *Landscape Ecology* e o *European Journal of Operational Research* (EJOR). A revista *Environmental Modeling & Software* publicou o artigo de Liu e Lin (2015), em que os autores propuseram um algoritmo cultural para a resolução do planejamento de colheita florestal com restrições de adjacência.

Könnyu e Tóth (2013) cujo artigo foi publicado na revista EJOR, compararam as três principais abordagens para resolução de problemas com restrição ARM (*Path*, *Maximal clique-based packing* e *Bucket*) com um algoritmo de plano de corte aplicado à abordagem *Path*. No mesmo periódico publicaram também Borges, Eid e Bergseng (2014), que avaliaram diferentes métodos de busca em vizinhança em um problema de planejamento florestal. O modelo utilizado pelos autores incluiu restrições *pairwise* de adjacência do tipo URM e de variação do volume colhido entre períodos.

TABELA 2-1 - FREQUÊNCIA ABSOLUTA E RELATIVA DE PUBLICAÇÕES POR PERIÓDICO PRESENTES NA AMOSTRA. E SEUS FATORES DE IMPACTO CORRESPONDENTES.

Periódico	Total de publicações	%	Fator de Impacto
Silva Fennica	5	11.40%	1,605
Forests	5	11.40%	2,116
Forest Science	4	9.10%	1,058
Forest Policy and Economics	4	9.10%	3,099
Annals of Operations Research	4	9.10%	2,284
European Journal of Operational Research (EJOR)	2	4.50%	3,806
Operations Research	2	4.50%	2,604
Ecological Modelling	1	2.30%	2,634
Acta Amazonica	1	2.30%	1,042
Bosque	1	2.30%	0,500
Landscape Ecology	1	2.30%	4,349
FORMATH	1	2.30%	Sem informação
Journal of Forest Research	1	2.30%	0,77
Scandinavian Journal of Forest Research	1	2.30%	1,667
INFOR: Information Systems and Operational Research	1	2.30%	0,600
Forest Ecology and Management	1	2.30%	3,126
Sains Malaysiana	1	2.30%	0,540
Natural Resource Modeling	1	2.30%	1,019
Environmental Modeling & Software	1	2.30%	4,552
Journal of Forest Economics	1	2.30%	1,761
Top	1	2.30%	0,965
Cerne	1	2.30%	0,795
Forest Systems	1	2.30%	1,138
European Journal of Forest Research	1	2.30%	2,354
Environmental Modeling and Assessment	1	2.30%	1,253

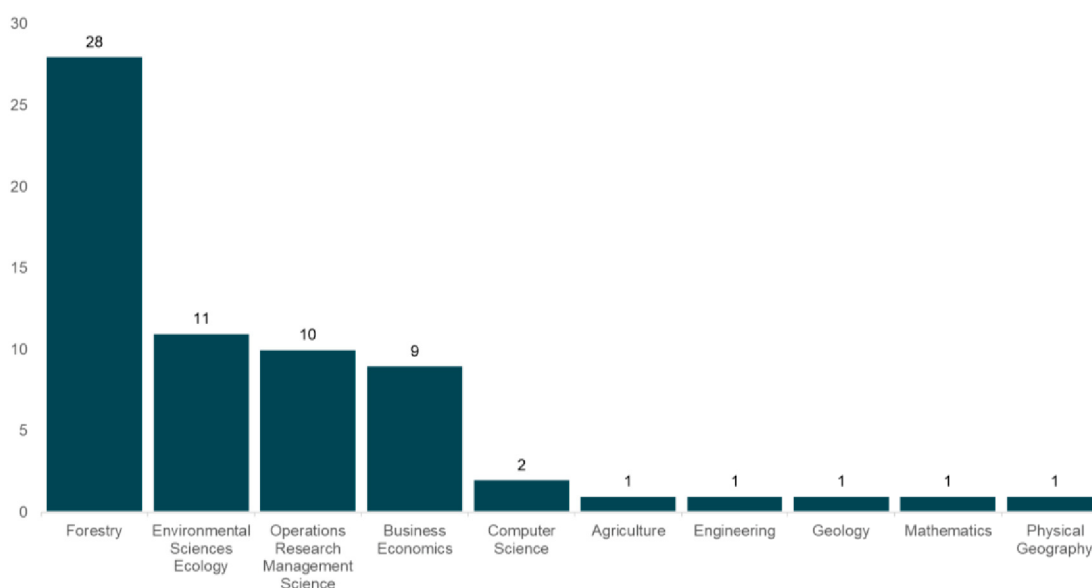
FONTE: A AUTORA (2020).

Quatro áreas de pesquisa se destacam dentre as principais tratadas pelos periódicos contidos na amostra de artigos analisada (Figura 2-9 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Quatorze periódicos pertencem à área de ciência florestal, principal área envolvida em pesquisas sobre a indústria de base florestal, entre eles os periódicos com maior número de publicações, previamente mencionados. Outra área em destaque é a de ciências ambientais, com onze artigos classificados dentro do tema. A questão ambiental é importante para o planejamento da colheita envolvendo restrições de adjacência, uma vez

que estas restrições são utilizadas para a mitigação de danos ambientais causados pelo processo de colheita da madeira.

A pesquisa operacional é um dos temas principais em dez artigos, de cinco diferentes periódicos (*Annals of Operations Research*, *Top*, *European Journal of Operational Research* – EJOR, INFOR e *Operations Research*). A relevância deste tema é esperada, uma vez que conceitos e ferramentas da pesquisa operacional são utilizados para a resolução do problema em questão. Por fim, a área de economia contém nove artigos relevantes. Estes formam os principais temas abordados pelas revistas da amostra. O somatório de artigos presentes na Figura 2-9 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** supera o total da amostra, uma vez que um mesmo periódico pode estar classificado em uma ou mais grandes áreas.

FIGURA 2-9 - PRINCIPAIS ÁREAS DE PESQUISA ABORDADAS PELOS PERÍODICOS CONTIDOS NA AMOSTRA.



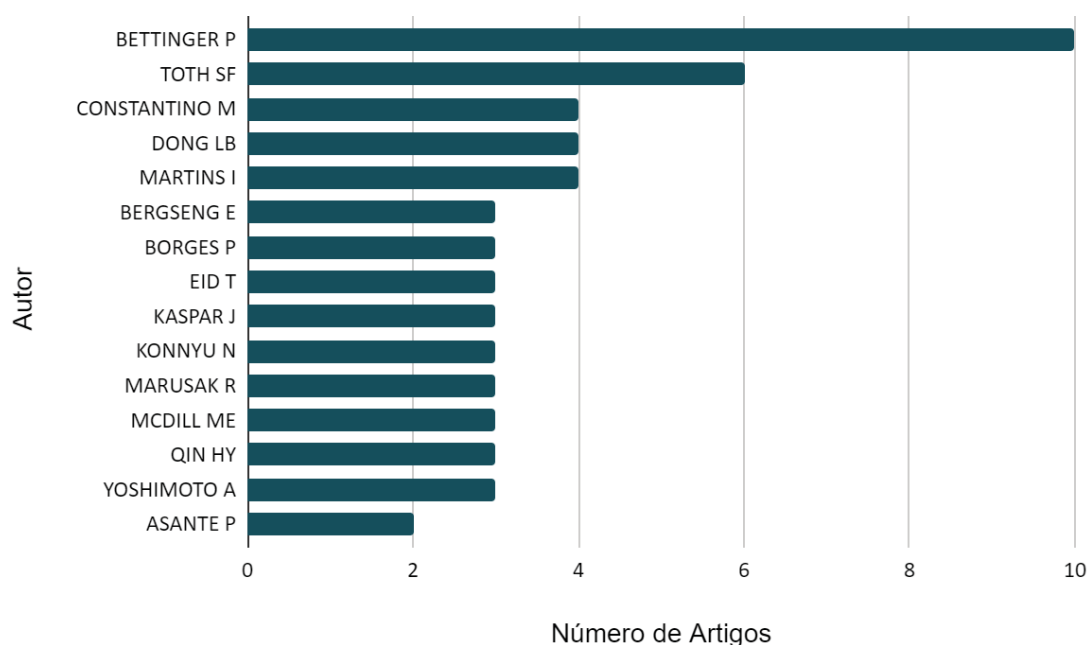
FONTE: A AUTORA (2020).

Dentre os periódicos da amostra, seis possuem *h-index* superior a 100. O índice H representa a quantidade (h) de artigos de um autor que recebeu ao menos a mesma quantidade h de citações ao longo de um período (HIRSCH, 2007), conceito que também se aplica a periódicos. A revista científica EJOR, apresenta o maior índice H da amostra (*h-index*: 226), é seguida pela revista *Forest Ecology and Management* (*h-index*: 152), *Ecological Modelling* (*h-index*:

139), *Operations Research* (*h-index*: 122), *Landscape Ecology* (*h-index*: 115) e *Environmental Modeling & Software* (*h-index*: 112).

Avaliando a distribuição dos trabalhos por autores (Figura 2-10**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), observa-se a existência de 14 autores com três ou mais artigos publicados. Entre estes destacam-se, Pete Bettinger, da Universidade da Georgia, especialista em planejamento florestal, com dez artigos sobre o tema, e Sándor F. Tóth, da Faculdade de Meio Ambiente e Ciências Florestais, Universidade de Washington, também nos Estados Unidos, com seis artigos.

FIGURA 2-10 - DISTRIBUIÇÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA POR AUTOR.

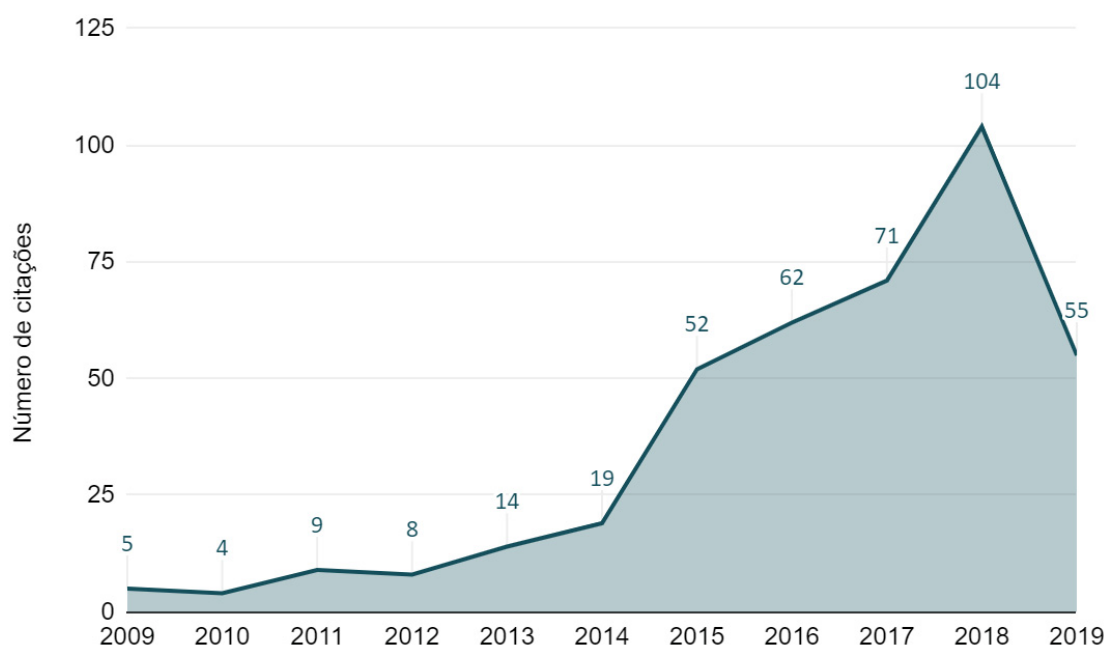


Fonte: A Autora (2020).

A análise de citação parte do princípio de que pesquisadores fundamentam seus trabalhos em obras publicadas, gerando uma lista de referências (MORAES et al., 2015). Esta análise avalia o número de citações recebidas por um artigo, autor ou instituição, e possibilita examinar a relevância de uma obra em uma determinada área de conhecimento (GRÁCIO; OLIVEIRA; MATOS, 2009).

A Figura 2-11 apresenta a evolução temporal do número de citações recebidas pelos artigos da amostra. As citações recebidas pelas publicações tiveram início a partir de 2009, subsequente ao ano que marca o início do intervalo de tempo fixado nesta pesquisa. O crescimento nos cinco primeiros anos foi discreto, e a partir do ano de 2014 o número de citações se intensificou, atingindo seu pico em 2018, com 104 citações. As publicações da amostra receberam no total 403 citações, o equivalente a uma média de 9,16 citações por artigo.

FIGURA 2-11 - EVOLUÇÃO DA QUANTIDADE DE CITAÇÕES DAS PUBLICAÇÕES DA AMOSTRA AO LONGO DO TEMPO.



Fonte: A Autora (2020).

Analisando as principais publicações da amostra em termos de citações (Tabela 2-2) observou-se que a publicação mais citada é a de Constantino, Martins e Borges (2008). Neste artigo foi apresentado uma das principais abordagens de resolução para a formulação ARM, a *Bucket*. Esta formulação baseia-se na definição de *buckets a-priori*, em que cada talhão  $i$  é alocado em apenas um *bucket*. Talhões designados para um mesmo *bucket* devem ser vizinhos, caso contrário divide-se o agrupamento mantendo apenas os talhões contíguos, sendo que a soma de suas áreas não deve ultrapassar o limite



determinado no modelo. Os *buckets* agendados para a colheita no período corrente não poderão ser adjacentes. Sándor Tóth, segundo autor mais relevante da amostra, possui três artigos entre os mais relevantes, correspondendo à 50% do total de artigos do autor na amostra. Além disso, seu artigo mais citado foi publicado no periódico *Environmental Modeling & Assessment*, revista de maior fator de impacto da amostra. Destaca-se também a publicação de Carvajal et al. (2013), que figura como o segundo artigo mais relevante da publicação, mas diferentemente do primeiro e terceiro lugares, foi publicada em 2013, cinco anos mais tarde, possuindo a maior média de citações por ano. Neste artigo os autores utilizaram a restrição ARM para minimizar a ocorrência de grandes áreas desmatadas, criando também regiões contíguas de floresta madura.

TABELA 2-2 - AUTORES COM MAIOR NÚMERO DE CITAÇÕES DA AMOSTRA.

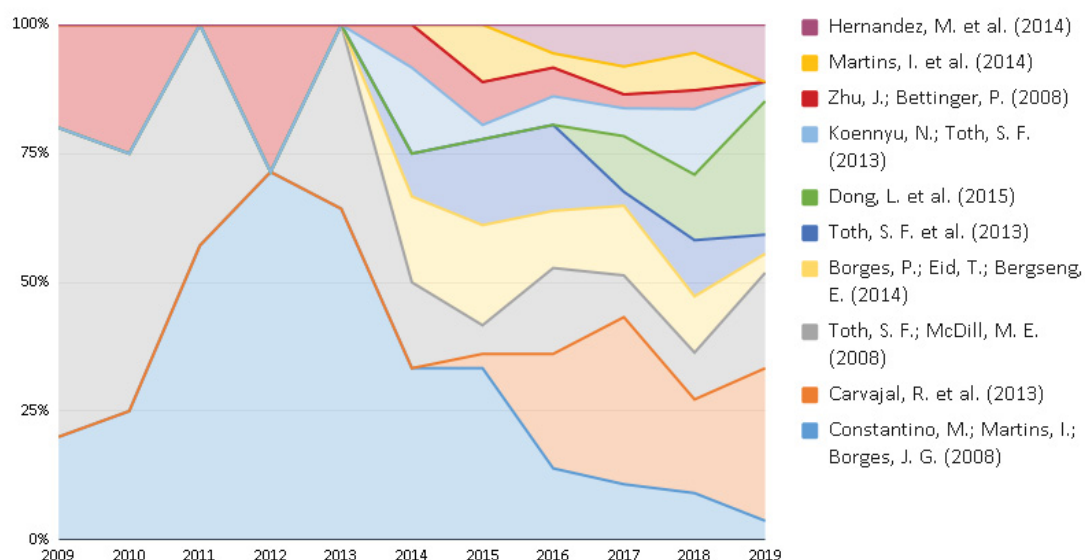
<b>Autores</b>	<b>Periódico</b>	<b>Ano de publicação</b>	<b>Fator de impacto</b>	<b>Total de citações</b>	<b>Média por ano</b>
Constantino, M.; Martins, I.; Borges, J. G.	<i>Operations Research</i>	2008	2,604	51	4,25
Carvajal, R. et al.	<i>Operations Research</i>	2013	2,604	39	5,57
Tóth, S. F.; McDill, M. E.	<i>Environmental Modeling &amp; Assessment</i>	2008	4,552	36	3,00
Borges, P.; Eid, T.; Bergseng, E.	<i>EJOR</i>	2014	3,806	25	4,17
Tóth, S. F. et al.	<i>Forest Science</i>	2013	1,058	21	3,00
Dong, L. et al.	<i>Forests</i>	2015a	2,116	18	3,60
Könnyű, N.; Tóth, S. F.	<i>EJOR</i>	2013	3,806	15	2,14
Zhu, J.; Bettinger, P.	<i>Forest Policy And Economics</i>	2008	3,099	13	1,08
Martins, I. et al.	<i>Top</i>	2014	0,965	11	1,83
Hernandez, M. et al.	<i>Journal of Forest Economics</i>	2014	1,761	11	1,83

Fonte: A Autora (2020).

A representatividade dos artigos mais citados ao longo dos anos, pode ser examinada com mais detalhes na Figura 4. No primeiro ano após a publicação dos primeiros artigos da amostra, o estudo de Tóth e McDill (2008) foi o mais citado. Nela é apresentado um modelo multiobjetivo, que teve como

propósito gerar alternativas de manejo que resultassem na criação de grandes trechos de floresta madura com a quantidade mínima de fronteiras. Com o passar dos anos verificou-se o aumento da relevância da pesquisa de Constantino, Martins e Borges (2008). A partir de 2016, nota-se o crescimento do interesse pelas pesquisas relacionadas às questões ambientais que vão além da limitação de área máxima de corte permitida, com a expansão no número de citações nos trabalhos de Carvajal et al. (2013), Tóth e McDill (2008) e Dong et al. (2015b). O estudo apresentado por Dong et al. (2015b) propôs um modelo multiobjetivo de planejamento florestal que inclui a maximização do estoque de carbono da floresta.

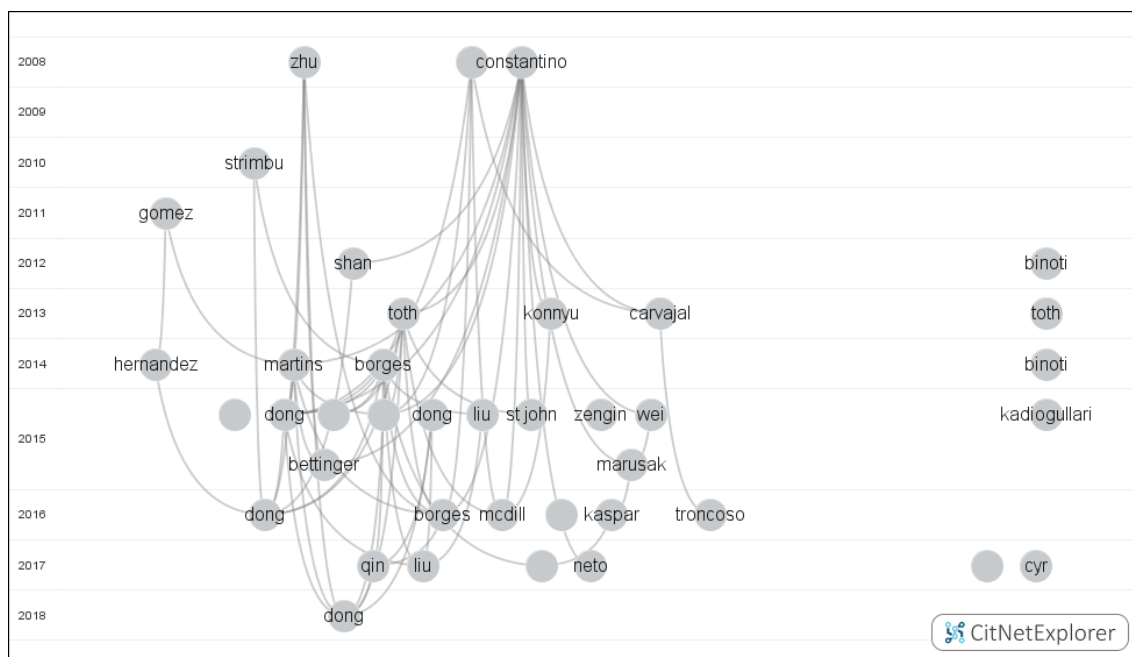
FIGURA 2-12 - EVOLUÇÃO DAS CITAÇÕES AO LONGO DO TEMPO DAS PUBLICAÇÕES MAIS CITADAS.



FONTE: A AUTORA (2020).

Existem diversos critérios para se estabelecer os relacionamentos entre diferentes autores, baseados no grau de citação direta entre seus trabalhos, análise de cocitações, análise de co-palavras, entre outros (FRANCO; FARIA, 2019). A Figura 2-13 apresenta a rede de citações dos artigos da amostra, em que se pode visualizar as relações de citação entre as publicações. Cada nó da figura representa um artigo da amostra e as arestas de ligação significam uma citação. As ligações partem dos artigos mais recentes para os mais antigos. Observa-se o grande nível de relacionamento entre as publicações da amostra, com apenas seis artigos não vinculados aos demais.

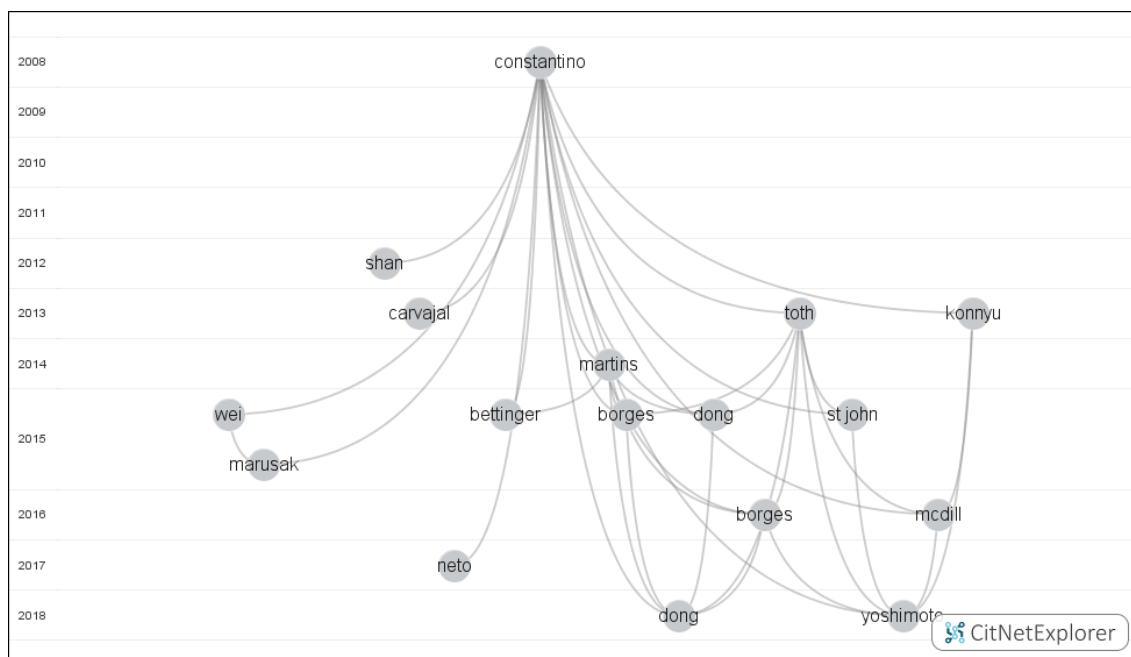
FIGURA 2-13 - RELAÇÃO DE CITAÇÃO ENTRE AS PUBLICAÇÕES DA AMOSTRA.



FONTE: A AUTORA (2020).

A Figura 2-14, traz um fragmento da Figura 2-13, apresentando a rede de citações com origem no artigo de Constantino, Martins e Borges (2008). O artigo foi citado por 16 outros trabalhos presentes na amostra. Publicado em 2008, a partir de 2012 foi citado ao menos uma vez em cada ano do horizonte de pesquisa definido. Como citado anteriormente, a relevância desta pesquisa na rede de citação é justificada, pois, a abordagem *Bucket* para a formulação ARM é proposta pelos autores neste artigo. Publicações que possuem em seu escopo a proposta de novas abordagens de resolução, novos algoritmos, entre outros., tendem a possuir grande número de citações pois se tornam base para a solução de novas pesquisas.

FIGURA 2-14 - REDE DE CITAÇÕES DA PUBLICAÇÃO CONSTANTINO, MARTINS E BORGES (2008).

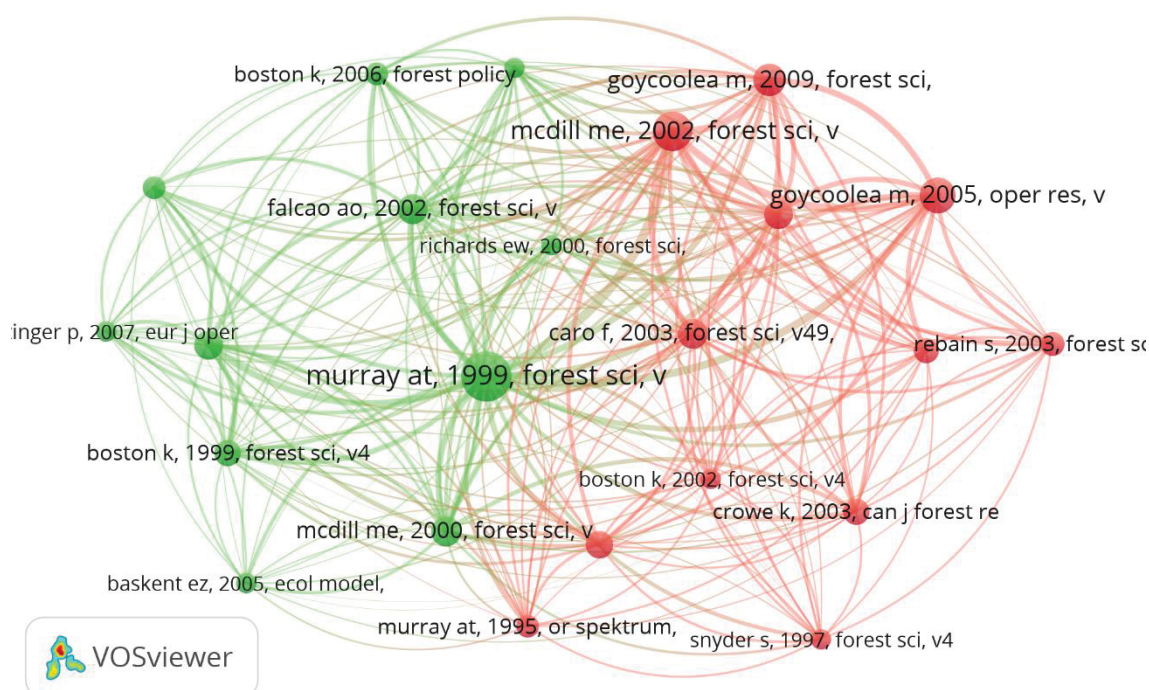


FONTE: A AUTORA (2020).

Segundo Santos (2015), a cocitação é uma forma importante de se associar documentos e autores, pois, caso dois documentos, ou dois autores, sejam citados simultaneamente em diversos trabalhos posteriores, existe um forte indício de que estes autores, ou estes documentos citados, versam sobre um mesmo tema. Redes de cocitação são utilizadas para auxiliar no processo de identificação das bases teóricas das publicações (ENDLER, 2016).

A Figura 2-15 ilustra a rede de cocitação, formada por referências citadas por no mínimo dez artigos da amostra. Dois *clusters* distintos foram gerados pela rede (cores verde e vermelha). O agrupamento verde possui como referência principal a publicação de Murray (1999), com 34 citações provenientes das publicações da amostra. Nela o autor faz a revisão sobre as duas principais abordagens de modelagem de colheita florestal com restrições de adjacência, a URM e ARM. O segundo *cluster*, de cor vermelha, tem como artigo central a publicação de McDill, Rebain e Braze (2002), com um total de 24 citações. Nesta publicação são propostas as abordagens Path e Cluster.

FIGURA 2-15 - REDE DE COCITAÇÃO.

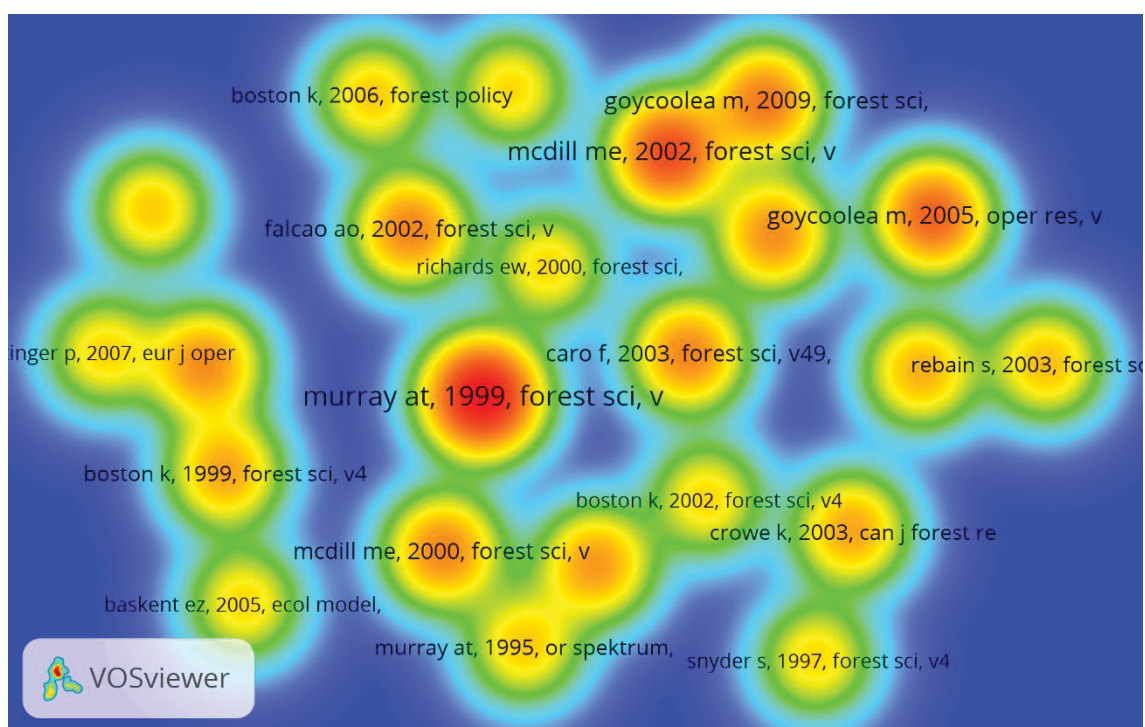


FONTE: A AUTORA (2020).

A Figura 2-16 representa um diagrama de densidade da rede de cocitação apresentada anteriormente. Este diagrama possui comportamento similar à um mapa de calor, em que o vermelho representa uma maior frequência no número de citações, enquanto a cor verde indica uma quantidade menor de citações. Nela confirma-se a influência das publicações de Murray (1999) e McDill, Rebain e Braze (2002), previamente citadas. É possível também observar a relevância dos trabalhos publicados por Goycoolea *et al.* (2005) e Goycoolea *et al.* (2009), com 21 e 18 citações respectivamente.



FIGURA 2-16 - - DIAGRAMA DE DENSIDADE DE COCITAÇÃO DE AUTORES.



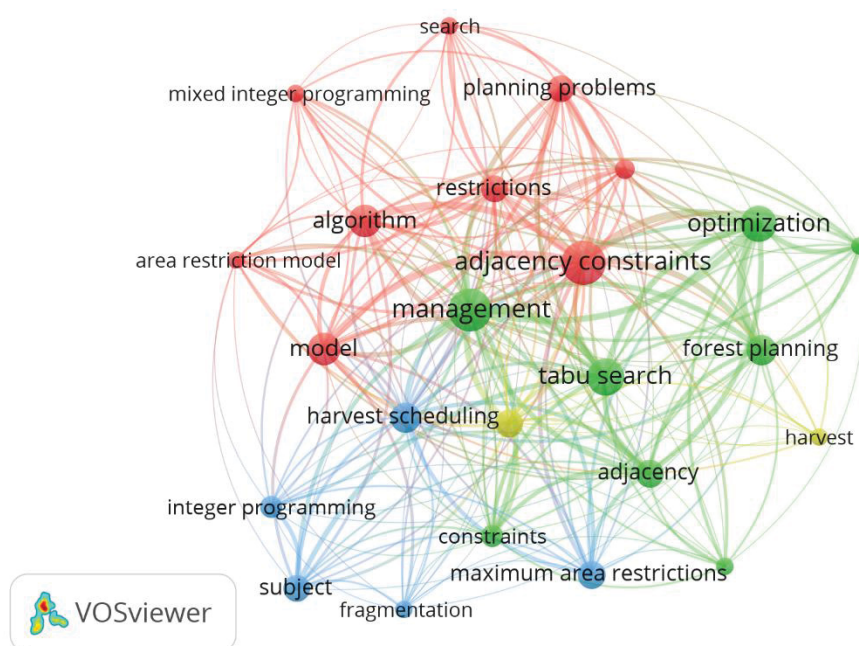
FONTE: A AUTORA (2020).

A estrutura de uma publicação científica é composta em grande parte por conjuntos de palavras, que unidos dão sentido ao documento, e por detalhes gráficos que complementam o texto (SANTOS, 2015). Segundo Franco e Faria (2019), autores de um determinado campo podem não ter trabalhado juntos, porém, publicam estudos que utilizam as mesmas palavras-chaves e temas semelhantes. Uma vez que um grupo de autores reconhece o mesmo padrão de relação entre termos específicos, conclui-se que este relacionamento entre palavras possui significado dentro da área estudada (SANTOS, 2015). Logo, a análise de coocorrência de palavras, sejam elas palavras-chaves, palavras do título, resumo, permite estabelecer as forças de ligação entre termos, possibilita a criação de um mapa de conhecimento (FRANCO; FARIA, 2019).

A rede de coocorrência de palavras ilustrada pela Figura 2-17, foi construída utilizando-se a opção “todas as palavras-chaves” do mapa de coocorrência do software VOSviewer. Definiu-se em cinco, o número mínimo de ocorrência de um termo para fazer parte da rede, resultando em um grafo com 24 nós. Quatro *clusters* foram gerados a partir dos termos selecionados, demonstrando um maior nível de relacionamento entre as palavras pertencentes

a um mesmo agrupamento. De forma geral observou-se a presença de termos que fazem referência ao tipo de problema abordado: ‘agendamento florestal’; características específicas do problema: ‘restrições de adjacência’, ‘restrições de área máxima’; e métodos utilizados para a resolução do problema: ‘programação inteira’, ‘inteira mista’, ‘algoritmos’ etc.

FIGURA 2-17 - REDE DE COOCORRÊNCIA DE PALAVRAS-CHAVE.



FONTE: A AUTORA (2020).

## 2.4 CONCLUSÃO

A maior parcela de publicações sobre colheita florestal considerando restrições de adjacência foi encontrada a partir do ano de 2015, com 65,9% do total. Foram encontradas ao todo 25 revistas na amostra, sendo que os periódicos *Silva Fennica*, *Forests*, *Forest Science*, *Forest Policy and Economics* e *Annals of Operations Research* são responsáveis por metade dos artigos publicados. Já as revistas de maior fator de impacto encontradas foram a *Environmental Modeling & Software*, *Landscape Ecology* e a *EJOR*.

Com relação à origem dos artigos, as publicações distribuem-se em três continentes, América, Europa e Ásia. Destes, o continente americano possui a maior contribuição com 38,6% dos artigos, destaque para os Estados Unidos com 12 publicações no total. Com relação ao local de aplicação do estudo observou-se a alteração na distribuição geográfica, com aumento no número de pesquisas realizadas utilizando como base florestas canadenses e a inclusão da Oceania entre os continentes avaliados.

A restrição do tipo ARM foi a mais utilizada pelos pesquisadores nos artigos. A preferência por modelos de restrição de área frente aos modelos de restrição de unidade está na flexibilidade alcançada com este tipo de abordagem. Flexibilidade esta que torna possível a colheita de talhões vizinhos, uma vez que a área combinada destes não ultrapasse o limite imposto pelo modelo, levando a menores reduções no VPL quando comparada à URM.

Para lidar com a natureza complexa do problema de colheita florestal considerando restrições de adjacência, 52,3% dos artigos utilizam métodos heurísticos como método de resolução. Problemas do tipo *NP-Hard*, como o tratado por esta revisão, têm seus tempos de solução crescendo exponencialmente em função do número de restrições e variáveis do problema. Isto tende a tornar o tempo de resolução por métodos exatos muito longos, justificando a escolha por heurísticas para encontrar boas soluções com menor tempo de processamento. Entre os algoritmos utilizados destaca-se a relevância da metheurística *Simulated Annealing*, utilizada por 8 artigos.



A análise da evolução temporal das citações demonstra que partir de 2016 houve o aumento do interesse pelas pesquisas relacionadas a questões ambientais, com a expansão no número de citações nos trabalhos que incorporam decisões multiobjetivo em seus problemas, considerando muitas vezes o mercado de carbono além da restrição de área máxima de corte na colheita florestal.

A partir das redes de citação e de cocitações, conclui-se que os artigos de Murray (1999), que discorre sobre as abordagens URM e ARM em uma revisão, de McDill, Rebain e Braze (2002), que em seu trabalho apresentam as *Path* e *Cluster*, e de Constantino, Martins e Borges (2008), que apresentam a formulação *Bucket*, servem de base teórica para os trabalhos que versam sobre a temática.

Após a análise dos artigos observou-se que apesar da popularidade de artigos com objetivos múltiplos publicações que tratem do planejamento otimizado da colheita florestal utilizando restrições de adjacência em conjunto com a otimização do transporte florestal em um mesmo modelo ainda são escassas, bem como modelos incorporando períodos heterogêneos em um mesmo horizonte de planejamento, indicando um potencial nicho de pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- AKBULUT, R. et al. Spatial forest plan development using heuristic processes seeded with a relaxed linear programming solution. **Forest Science**, v. 63, n. 5, p. 518-528, 2017. doi: 10.5849/FS-2017-040
- AUGUSTYNICZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. da. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 649-656, 2015. doi: 10.1590/01047760201521042006
- BACHMATIUK, J.; GARCIA-GONZALO, J.; BORGES, J. G. Analysis of the performance of different implementations of a heuristic method to optimize forest harvest scheduling. **Silva Fennica**, 2015. doi: 10.14214/sf.1326
- BELGACEM, M. N.; PIZZI, A. (Ed.). **Lignocellulosic Fibers and Wood Handbook: Renewable Materials for Today's Environment**. John Wiley & Sons, 2016.
- BORGES, P.; BERGSENG, E.; EID, T. Adjacency constraints in forestry-a simulated annealing approach comparing different candidate solution generators. **Mathematical & Computational Forestry & Natural Resource Sciences**, v. 6, n. 1, 2014.
- BORGES, P.; EID, T.; BERGSENG, E. Applying simulated annealing using different methods for the neighborhood search in forest planning problems. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 3, p. 700-710, 2014. doi: 10.1016/j.ejor.2013.08.039
- CARVAJAL, R. et al. Imposing connectivity constraints in forest planning models. **Operations Research**, v. 61, n. 4, p. 824-836, 2013. doi: <https://doi.org/10.1287/opre.2013.1183>
- CARVALHO, M. M. et al. An overview of the literature on technology roadmapping (TRM): Contributions and trends. **Technological Forecasting and Social Change**, 80(7): 1418-1437, 2013. doi: 10.1016/j.techfore.2012.11.008

CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; BORGES, J. G. A new mixed-integer programming model for harvest scheduling subject to maximum area restrictions. **Operations Research**, 56(3), 542-551, 2008. doi: 10.1287/opre.1070.0472

CYR, G. et al. Using operating area size and adjacency constraints to mitigate the effects of harvesting activities on boreal caribou habitat. **Landscape Ecology**, 32(2), 377-395, 2017. doi: 10.1007/s10980-016-0455-x

DONG, L. et al. A comparison of a neighborhood search technique for forest spatial harvest scheduling problems: A case study of the simulated annealing algorithm. **Forest Ecology and Management**, 356, 124-135, 2015a. doi: 10.1016/j.foreco.2015.07.026

\_\_\_\_\_. Spatial forest harvest scheduling for areas involving carbon and timber management goals. **Forests**, 6(4), 1362-1379, 2015b. doi: 10.3390/f6041362

\_\_\_\_\_. Evaluating the neighborhood, hybrid and reversion search techniques of a simulated annealing algorithm in solving forest spatial harvest scheduling problems. **Silva Fennica**, 50(4), 1-20, 2016. doi: 10.14214/sf.1622

\_\_\_\_\_. Reflections on the number of independent solutions for forest spatial harvest scheduling problems: a case of simulated annealing. **Silva Fennica**, 52(1), 7803, 2018. doi: 10.14214/sf.7803

DONG, L.; LU, W.; LIU, Z. Developing alternative forest spatial management plans when carbon and timber values are considered: A real case from northeastern China. **Ecological modelling**, 385, 45-57, 2018. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2018.07.009

ENDLER, K.D. et al. Operations Scheduling in Permutation Flow Shop Systems: A Bibliometric Contribution. **IEEE Latin America Transactions**, 13(12), 3966-3973, 2015.

ENDLER, K.D. **25 anos de Lean Supply: uma contribuição bibliométrica. Supply chain specialization course**, Universidade Federal do Paraná. 21p, 2016.

FRANCO, N. M. G.; FARIA, L. I. L. Colaboração científica intraorganizacional: análise de redes por coocorrência de palavras-chave. **Em Questão**, 25(1), 87-110, 2019.

GLÄNZEL, W. **Bibliometrics as a research field: a course on theory and application of bibliometric indicators**. [S. l.]: Courses Handout 111p, 2003.

GRÁCIO, M. C. C.; OLIVEIRA, E. F. T.; MATOS, G. I. Visibilidade dos pesquisadores no tema Estudos Métricos: análise de citação e co-citação nos periódicos do SciELO. **Ibersid: Revista de Sistemas de Información y Documentación**, 3, 81-86, 2009.

HERNANDEZ, M. et al. Efficiency in forest management: A multiobjective harvest scheduling model. **Journal of forest economics**, 20(3), 236-251, 2014. doi: 10.1016/j.jfe.2014.06.002

KAŠPAR, J.; MARUŠÁK, R.; BETTINGER, P. Time efficiency of selected types of adjacency constraints in solving unit restriction models. **Forests**, 7(5): 102., 2016. doi: 10.3390/f7050102

KÖNNYŰ, N.; TÓTH, S. F. A cutting plane method for solving harvest scheduling models with area restrictions. **European Journal of Operational Research**, 228(1), 236-248, 2013. doi: 10.1016/j.ejor.2013.01.020

LIU, W. Y; LIN, C. C. Spatial forest resource planning using a cultural algorithm with problem-specific information. **Environmental Modelling & Software**, 71, 126-137, 2015. doi: 10.1016/j.envsoft.2015.06.002

MARINS, F. A. S. **Introdução à pesquisa operacional**. Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 216p, 2011.

MARTINS, I. et al. Modeling target volume flows in forest harvest scheduling subject to maximum area restrictions. **Top**, 22(1), 343-362, 2014. doi: 10.1007/s11750-012-0260-x

MCDILL, M. E.; REBAIN, S. A.; BRAZE, J. Harvest scheduling with area-based adjacency constraints. **Forest Science**, 48(4), 631-642, 2002. doi: 10.1093/forestscience/48.4.631

MCDILL, M. E. et al. Comparing model I and model II formulations of spatially explicit harvest scheduling models with maximum area restrictions. **Forest Science**, 62(1), 2016.

MORAES, M. et al. Redes de Citação: estudo de rede de pesquisadores a partir da competência em informação. **Em Questão**, 21(2), 181-202, 2015.

MURRAY, A. T. Spatial restrictions in harvest scheduling. **Forest Science**, 45(1), 45-52, 1999. doi: 10.1093/forestscience/45.1.45

NETO, T. et al. Forest harvest scheduling with clearcut and core area constraints. **Annals of Operations Research**, 258(2), 453-478, 2017. doi: 10.1007/s10479-016-2313-2

QIN, H.; DONG, L.; HUANG, Y. Evaluating the effects of carbon prices on trade-offs between carbon and timber management objectives in forest spatial harvest scheduling problems: a case study from Northeast China. **Forests**, 8(2), 43, 2017. doi: 10.3390/f8020043

SANTOS, R.A. **Análise de coocorrência de palavras na pesquisa brasileira em HIV/AIDS indexada na Web of Science no período 1993-2013**. Dissertação, Faculdade de Biblioteconomia e Comunicação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 156p, 2015.

STRIMBU, B. M.; INNES, J. L.; STRIMBU, V. F. A deterministic harvest scheduler using perfect bin-packing theorem. **European Journal of Forest Research**, 129(5), 961-974, 2010. doi: 10.1007/s10342-010-0405-0

THOMPSON, E.F. et al. Integrating timber and wildlife management planning. **The Forestry Chronicle**, 49(6): 247-250, 1973. doi: 10.5558/tfc49247-6

TÓTH, S. F.; MCDILL, M. E. Promoting large, compact mature forest patches in harvest scheduling models. **Environmental Modeling & Assessment**, 13(1), 1-15, 2008. doi: 10.1007/s10666-006-9080-4

TÓTH, S. F. et al. Testing the use of lazy constraints in solving area-based adjacency formulations of harvest scheduling models. **Forest Science**, 59(2): 157-176, 2013. doi: 10.5849/forsci.11-040

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **CitNetExplorer**. Version 1.0.0. Leiden University, The Netherlands, 2014.

\_\_\_\_\_. **VOSviewer**. Version 1.6.13. Leiden University, The Netherlands, 2019.

WEI, R.; MURRAY, A. T. Spatial uncertainty in harvest scheduling. **Annals of Operations Research**, 232(1), 275-289, 2015. doi: 10.1007/s10479-012-1178-2

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P. A new optimization model for spatially constrained harvest scheduling under area restrictions through maximum flow problem. **Forest Science**, 64(4), 392-406, 2018. doi: 10.1093/forsci/fxy006

ZHU, J.; BETTINGER, P. Estimating the effects of adjacency and green-up constraints on landowners of different sizes and spatial arrangements located in the southeastern US. **Forest Policy and Economics**, 10(5), 295-302, 2008. doi: 10.1016/j.forpol.2007.11.006

### 3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DE RESTRIÇÕES AMBIENTAIS DE ADJACÊNCIA NO SETOR FLORESTAL

#### RESUMO

Para superar a concorrência e quedas de desempenho, a indústria de produtos florestais deve mudar seu modo de fazer negócio e compreender melhor sua cadeia de suprimentos e as necessidades de gestores florestais. Modelos matemáticos são amplamente utilizados para este fim e tiveram um incremento de complexidade em sua formulação ao longo dos anos, a fim de absorver novas demandas da indústria. Entre estas demandas pode-se citar a inclusão de restrições de adjacência, que limitam a área permitida para a colheita em um determinado período, minimizando assim, potenciais impactos ambientais. Objetiva-se, portanto, realizar uma revisão de literatura sobre o estado da arte do uso de restrições do tipo ARM (*Area Restriction Model*) e URM (*Unit Restriction Model*) no setor florestal.

**Palavras-chave:** Planejamento florestal; pesquisa operacional; restrições espaciais.

#### ABSTRACT

To overcome the competition and decline in performance, the forest products industry must change the way it does business and better understand its supply chain the needs of forest managers. Mathematical models are widely used for this purpose and have had an increase in complexity in their formulation over the years to absorb new demands from the industry. Among these demands, we can mention the inclusion of adjacency restrictions, which limit the area allowed for harvesting in a certain period, thus minimizing potential environmental impacts. Therefore, our objective is to carry out a literature review on the state of the art of the use of ARM (*Area Restriction Model*) and URM (*Unit Restriction Model*) restrictions in the forestry sector.

**Keywords:** Forest planning, operations research, spatial constraints.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Com uma cadeia divergente, a indústria florestal contém diversas etapas e atores. Entre estas etapas destaca-se o manejo florestal, que inclui entre suas decisões o planejamento do sequenciamento da colheita (RÖNNQVIST et al., 2015). O sequenciamento tem por objetivo satisfazer a demanda de clientes. Esta etapa de planejamento evoluiu ao longo dos anos, incluindo novas necessidades dos gestores florestais como por exemplo, relações de vizinhança entre talhões, que se mal gerenciadas podem gerar potenciais impactos ambientais. De acordo com Gomide, Arce e Silva (2010), associações internacionais passaram a incentivar processos de maior sustentabilidade de florestas restringindo o corte de áreas máximas em até 120 acres. Este fato, segundo os autores, corrobora com o fato de uma visão mais integrada de florestas ganhar mais espaço no mercado.

De acordo com Augustynczyk et al. (2015), a inserção de relações de adjacência entre os talhões na formulação dos planejamentos da colheita fez com que o nível de complexidade dos problemas aumentasse. O primeiro registro do uso de restrições de adjacências no planejamento florestal foi observado no trabalho publicado por Thompson et al. (1973), em que pares vizinhos de talhões eram impedidos de serem colhidos em um mesmo período. Após o primeiro registro diversas abordagens de restrições espaciais foram desenvolvidas no ambiente florestal. Segundo Gomide, Arce e Silva (2010) restrições de espaciais podem ser diferenciadas em três diferentes linhas: a primeira considera a conectividade entre talhões; a segunda, em que se enquadram as restrições de adjacência, trabalha com o conceito de dispersão; e a terceira trabalha com conceitos das duas primeiras.

As restrições de adjacência podem ainda ser subdivididas em dois grupos, as restrições URM (*unit restriction model*) e ARM (*area restriction model*). A abordagem URM torna incompatível a colheita de áreas vizinhas em um mesmo período, considerando que a área máxima de colheita é definida pelo tamanho da unidade de manejo sem importar o quão grande ou pequeno é o talhão (KAŠPAR; MARUŠÁK; BETTINGER, 2016). Esta formulação sofreu alterações conceituais gerando uma versão mais adaptável, a restrição ARM. Segundo



Gomide, Arce e Silva (2013), a diferença entre as abordagens está na flexibilidade em aceitar ou não o corte de talhões vizinho (ARM), considerando um determinado critério específico, como por exemplo um limite para a área máxima de corte no período.

Desta forma, esta pesquisa tem por objetivo realizar uma revisão de literatura que possa proporcionar maior compreensão sobre a utilização de restrições de adjacência no âmbito da colheita florestal.

### 3.2 DESENVOLVIMENTO

Nos anos de 1970 houve um aumento da preocupação com relação às questões ambientais relacionadas à colheita florestal (WEINTRAUB, 2007). Grandes áreas colhidas não são esteticamente agradáveis, promovem a erosão do solo por deixá-lo desprotegido, e podem gerar impactos à fauna local (CARVAJAL et al., 2013). A partir deste cenário, alternativas de manejo foram propostas para minimizar danos ambientais causados pela atividade florestal de colheita, dentre estas os modelos de planejamento utilizando o conceito de área máxima ou adjacência (WEINTRAUB, 2007).

Os modelos de colheita considerando restrições de adjacência possuem o conceito de tempo de *green-up* em seus modelos, garantindo um intervalo de tempo mínimo entre colheitas em unidades de manejo vizinhos (BORGES; BERGSENG; EID, 2014). Os tempos de exclusão são utilizados geralmente quando um talhão é incapaz de se recuperar em menos de um ano, garantindo que a área colhida tenha se regenerado e não se formem grandes áreas descobertas em períodos próximos (BOSTON; BETTINGER, 2001). Desta forma além de se impedir a colheita de talhões contíguos em um mesmo período, restringe-se também a colheita por um determinado intervalo de tempo de áreas vizinhas à uma já colhida.

Restrições de adjacência florestais têm sua origem na teoria dos grafos, mais especificamente no problema de conjuntos independentes, ou conjunto de estabilidade, em inglês conhecido por *Stable Set Problem* (SSP) (TÓTH et al., 2013a).

O problema de conjuntos independentes pode ser explicado da seguinte maneira, sendo o grafo  $G = (V, E)$  um grafo não orientado, o qual é constituído por um conjunto não nulo e finito de vértices  $V$ , e por um conjunto, também finito, de arestas  $E$ . O conjunto independente do grafo  $G$  pode ser definido por um conjunto de nós  $S$ , pertencentes à  $V$ , cujos vértices sejam pares não adjacentes (REBENNACK, 2008).

### 3.3 APLICAÇÕES NO PLANEJAMENTO FLORESTAL

Durante anos considerou-se impossível a formulação da abordagem ARM de forma linear dada sua complexidade, logo heurísticas e metaheurísticas tornaram-se a estratégia mais comum de resolução para este tipo de problema (TÓTH et al., 2013a). Porém, com o aprimoramento da tecnologia tornou-se possível o desenvolvimento de novas formulações utilizando programação inteira para este problema (GOYCOOLEA et al., 2009) e três modelos ganharam destaque: a formulação *Path*, *Cluster* e *Bucket*.

A formulação *Path* proposta por McDill, Rebain e Braze (2002), enumera de maneira recursiva todos os conjuntos de talhões que excedem a área máxima definida durante a fase de planejamento, criando restrições para cada uma das infactibilidades identificadas. Esta formulação cria restrições de maneira similar ao problema da mochila (GOYCOOLEA et al., 2009; TÓTH et al., 2013a), tornando o número de restrições do modelo exponencial (MARTINS et al., 2014). A abordagem *cluster*, também proposta por McDill, Rebain e Braze (2002), utiliza uma variável para cada conjunto cuja área total somada não exceda o valor estabelecido pelo problema. Esta abordagem pode utilizar restrições de adjacência usadas no modelo URM, pois os potenciais *clusters* devem ser conhecidos antes da construção do modelo (TÓTH et al., 2013a). Diferentemente da formulação *Path*, que possui uma quantidade exponencial de restrições, a abordagem *Cluster* gera uma quantidade exponencial de variáveis ao problema.

A abordagem mais recente entre as três clássicas, a *bucket*, é apresentada em um modelo proposto por Constantino, Martins e Borges (2008). Esta formulação possui um número de variáveis e restrições polinomial, que segundo os autores pode superar obstáculos computacionais encontrados em outros métodos exatos. Os autores seguem algumas premissas para a formulação das adjacências na abordagem proposta. A primeira delas faz com que um talhão deva pertencer a apenas um *cluster* de talhões. A soma das áreas dos talhões pertencentes a este grupo não deve exceder a área máxima de corte permitida pelo problema, e os agrupamentos não devem ser adjacentes. A

proposta dos autores foi avaliada em testes com dados de florestas reais e hipotéticas. Os testes reais foram feitos com base na floresta Nacional Leiria, em Portugal e na floresta El Dorado, nos Estados Unidos. A resolução dos testes foi realizada com o algoritmo *branch and bound* no *solver* comercial CPLEX 9.0. O tempo de resolução máximo permitido pelos autores foi de 2 horas e as soluções encontradas para todas as instâncias obtiveram *gap* próximo de 1%.

Zhu e Bettinger (2008), avaliaram o efeito da limitação da área máxima de corte associada ao tempo de *green-up* de 2 anos nos planos de manejo. Para isso desenvolveram um conjunto de 27 problemas hipotéticos com características semelhantes às encontradas no sudeste dos Estados Unidos, a fim de avaliar o modelo por eles proposto. As instâncias possuíam diferentes tamanhos de área (pequeno, médio e grande); padrões de distribuição da floresta (agrupada, dispersa e aleatória), e diferentes distribuições de classe de idade (jovem, normal e madura).

A restrição espacial de adjacência considerada por Zhu e Bettinger (2008) para a formulação do problema foi a ARM, com um limite de 97,1 hectares e horizonte de planejamento de 20 anos, dividido em 20 períodos de um ano. Para a resolução do problema, os autores fizeram uso de uma metaheurística que utiliza as heurísticas *threshold accepting*, busca tabu 1-opt e busca tabu 2-opt, nesta ordem. Os resultados obtidos com a metaheurística são então comparados aos resultados obtidos pelo modelo de programação linear relaxado.

Zhu e Bettinger (2008) concluíram que donos de áreas menores são os mais afetados pela inclusão de restrições espaciais de adjacência, pois possuem uma menor flexibilidade no rearranjo do agendamento de colheita. Característica semelhante foi observada em florestas jovens, uma vez que a flexibilidade é comprometida nos primeiros anos de planejamento dificultando a geração de um plano de manejo capaz de suprir a demanda de madeira estipulada. Apesar de se observar os maiores efeitos em florestas que fossem ao mesmo tempo pequenas e jovens, a maior redução em termos de valor foi verificada em florestas pequenas e antigas.

Áreas de florestas maduras e a redução da dispersão de regiões com florestas são importantes para a manutenção da fauna local (TÓTH; MCDILL,

2008). No entanto, os mesmos autores citam que modelos sujeitos a restrições de adjacência têm a tendência a dispersar as atividades de colheita ao longo do terreno. Para mitigar este efeito os autores propõem um modelo multiobjetivo, baseado no trabalho de Rebain e McDill (2003), que identifica alternativas de manejo que resultem na criação de grandes trechos de floresta madura com a quantidade mínima de fronteiras.

A área máxima permitida para a colheita no problema proposto por Tóth e McDill (2008) foi de 40 ha, sendo permitida a formação de blocos de colheita, uma vez que todos os talhões não ultrapassavam este limite individualmente. Foi considerado um horizonte de planejamento de 60 anos, dividido em 3 períodos de 20 anos. O trecho de área madura deveria ter no mínimo 60 anos e corresponder a áreas de no mínimo 50 hectares. O modelo foi resolvido utilizando o algoritmo *Alpha-Delta* com resultados que geraram uma quantidade menor de trechos de floresta madura, porém, de maior área e mais compactos, ou seja, com um menor número de fronteiras.

Strimbu, Innes e Strimbu (2010) propõe um algoritmo de agendamento de colheita que possui critérios de otimização aos níveis de talhão e de floresta. O agendamento de derrubada foi realizado ajustando o algoritmo FFD (*First Fit Decreasing*) às condições do teorema perfeito de empacotamento PBPT (*Perfect Bin-Packing Theorem*). Quando as condições não eram alcançadas uma solução de programação inteira mista era desenvolvida para ajustar os padrões dos talhões às necessidades de distribuição do PBPT. Este ajuste garantia a performance do FFD. Os autores testaram a abordagem proposta utilizando dados provenientes de três áreas da Columbia Britânica, no Canadá, cuja área combinada é equivalente a 1,75 milhões de hectares. A restrição espacial de adjacência utilizada foi a URM. Os autores consideram como unidades de manejo talhões maiores que 5 ha, ou a união de talhões adjacentes menores que 5 hectares. Além da restrição URM, o modelo também inclui restrições de *green-up* e um limite máximo anual de corte (*Annual Allowable Cut – AAC*). Foram testados quatro períodos de *green-up*: 1, 5, 10 e 20 anos. O horizonte de planejamento avaliado foi de 100 anos. Os resultados obtidos pelo FFD ajustados foram comparados às respostas alcançadas pelo modelo de programação linear relaxado e, também, com os valores obtidos pelo algoritmo

SA. O algoritmo proposto por Strimbu, Innes e Strimbu (2010), e o modelo de PL relaxado geraram respostas em menos de 3 minutos, enquanto a metaheurística SA levou 6 horas para produzir um resultado. O limite máximo de corte não possuiu tanta variação com a versão adaptada do FFD, e as restrições de adjacência não possuíram tanto impacto no algoritmo. Porém ao se utilizar a SA as restrições de adjacência e de tempo de *green-up* reduziram em 70% o limite máximo de corte permitido.

Aliar diversas questões ambientais, como por exemplo não colher árvores muito novas, a organização dos talhões por idade, entre outras, e a questão econômica (maximizar o VPL – Valor Presente Líquido), muitas vezes são desejo do gestor florestal. Para suprir estas demandas um modelo binário não linear multiobjetivo foi proposto por Gómez et al. (2011). Entre as restrições do modelo encontra-se a restrição ARM, em que para a geração dos blocos os autores utilizaram a abordagem *Path*. O modelo foi aplicado em uma floresta de 3347,7 hectares de *Pinus caribaea* cubana e em um cenário hipotético. O método evolucionário SSPMO (*Scatter Search Procedure for Multiobjective Optimization*) foi utilizado para a resolução do problema. A abordagem consiste em duas etapas, o primeiro estágio é a geração de um conjunto inicial de pontos eficientes utilizando a Busca Tabu. Após a melhora deste conjunto inicial tem-se o processo de busca dispersa (*scatter search*). Para o cenário teórico o modelo proposto foi capaz de equilibrar as classes de idade dos talhões, porém para o caso real a abordagem não foi eficiente. A dificuldade encontrada na floresta real foi ocasionada pela estrutura desbalanceada da área e pela restrição de área imposta pelo modelo.

A heurística SA é uma das mais utilizadas para a resolução do planejamento florestal, como demonstra o resultado encontrado na seção anterior. Apesar da popularidade desta heurística, Shan et al. (2012), testaram a eficiência da metaheurística enxame de partículas, em inglês PSO (*Particle Swarm Optimization*), para a otimização do planejamento de colheita considerando restrições de fluxo de madeira, restrições de adjacência e *green-up*. A pesquisa foi realizada utilizando como base uma floresta localizada no sul dos Estados Unidos. Os autores buscaram maximizar o VPL ao longo do horizonte de planejamento, de 20 anos, dividido em 20 períodos de um ano cada.

A restrição de adjacência considerada foi a URM, com tempo de *green-up* de 1 ano. Além disso, o volume colhido em cada período não poderia ultrapassar mais de 20% da média de colheita anual, mantendo um fluxo de madeira equilibrado. Os resultados obtidos pelos autores com a aplicação da PSO na resolução do planejamento, com a inclusão do impedimento da colheita de talhões vizinhos em um mesmo período não foram satisfatórias, uma vez que em apenas 86% dos testes realizados o valor ótimo global foi alcançado.

Binoti et al (2012) propõem um modelo de regulação de florestas equiâneas com restrições de adjacência. A formulação foi construída com base no modelo tipo I e inclui a restrição URM. O modelo foi testado em uma fazenda localizada na região de Minas Gerais, Brasil, em que 3.412 ha são destinados à produção florestal. Os autores consideraram adjacentes talhões cuja distância entre as fronteiras fosse menor ou igual a 50 metros. O horizonte de planejamento foi definido em 18 anos, equivalente a 1,5 ciclos. A resolução do problema foi feita com a metaheurística algoritmo genético (AG). A comparação do modelo proposto foi feita com o modelo clássico. A inclusão das restrições de adjacência gerou uma redução no VPL média de 8%, comparado ao modelo tradicional. O algoritmo genético foi eficiente na resolução do problema proposto.

Könnyű e Tóth (2013), comparam as três abordagens clássicas para resolução de problemas com restrição ARM, a formulação *Path*, formulação *Maximal Clique-Based Packing* e a formulação *Bucket* com um algoritmo de plano de corte aplicado ao modelo *Path*. O algoritmo inicia o modelo sem restrição de adjacência, e adiciona as restrições caso ocorra a violação destas durante a otimização, diminuindo assim o número de restrições para casos que possuam uma área limite muito grande. Foram testadas 60 instâncias hipotéticas e 8 testes reais. Os estudos de caso foram realizados em florestas canadenses, da região da Nova Escócia e de *New Brunswick*, e americanas, da região da Califórnia, Pensilvânia e Washington. A abertura máxima de corte permitida nos testes foram: 40, 50 e 60 ha para as instâncias hipotéticas; 40, 50, 60 e 80 ha para os quatro problemas reais menores; 24.28, 32.37, 40.47 e 48.56 para as instâncias de Washington. 48.56, 60.70, e 72.84 para as instâncias de *El Dorado* (Califórnia), 40 e 60 para *Shulkell* (Nova Escócia) e 21, 30 e 40 ha para os testes de NBCL5 (*New Brunswick*). Os autores decidiram incluir variações no limite

máximo permitido de área de colheita para avaliar a performance do algoritmo em demarcações maiores ou menores. Os testes foram resolvidos com o auxílio do solver comercial CPLEX. Os resultados obtidos demonstraram que quanto maior a área máxima de colheita permitida, ou maior o número de unidades de manejo, o algoritmo proposto alcançou respostas melhores em comparação aos demais modelos.

Tóth et al. (2013a), assim como o trabalho anterior, testaram as três abordagens clássicas para resolução do problema de colheita florestal com restrições de área máxima. Os autores então compararam seus resultados com os obtidos com o a utilização do algoritmo *Lazy Path* na formulação *Path*. Os autores resolveram 60 testes hipotéticos e 8 testes reais. Os horizontes de planejamento variaram de 25 a 60 anos, com rotação mínima de 60 anos para os testes hipotéticos e 80 anos para os reais. De forma semelhante a Könnyű e Tóth (2013), o algoritmo proposto pelos autores retira as desigualdades da formulação *Path*, e as adiciona em um conjunto de restrições *lazy*. Quando o *solver* encontra uma solução potencial, ele então, verifica se o conjunto de restrições é violado, caso seja, ele é então adicionado ao modelo. A resolução dos problemas foi implementada na linguagem Java e resolvida com o *solver* comercial o CPLEX 12.1 utilizando a tecnologia *Concert*. O algoritmo proposto obteve melhora significativa nos tempos de resolução dos problemas, no entanto os tempos para formulação do modelo não sofreram alteração.

Carvajal et al. (2013) fizeram a inclusão de regiões contíguas de florestas maduras em um modelo de planejamento de colheita. O modelo proposto pelos autores teve por objetivo agendar o corte dos talhões de forma a maximizar o lucro, evitando grandes áreas colhidas em um mesmo período. Para tanto faz-se o uso da restrição ARM, formulada pelo método *Path*, mantendo uma média final de idade mínima para a floresta, de forma a criar regiões conectadas de floresta madura. As unidades de manejo podem ser colhidas apenas uma vez ao longo do horizonte de planejamento, e caso tenha sido colhida não pode ser incluída na região de florestas maduras. Para a resolução do problema uma nova proposta do algoritmo *branch-and-cut* foi utilizada. O modelo foi testado em instâncias reais e hipotéticas, e implementado em C++ utilizando o CPLEX como



*solver*. Nas quatro horas definidas como parâmetro para resolução do problema, os autores obtiveram soluções factíveis de boa qualidade.

A publicação de Tóth et al. (2013b) tem por objetivo gerar alternativas de manejo de custo mínimo em audições do ECOSEL com a utilização de um modelo multiobjetivo. O ECOSEL é um mecanismo de leilões que permite que pessoas ou organizações façam lances em serviços de ecossistemas florestais. O sistema faz uso da otimização para identificar o plano de manejo com melhor custo-benefício (UNIVERSITY OF WASHINGTON, 2019). A pesquisa utilizou como estudo de caso a floresta *Pack*, localizada na Califórnia. O modelo possui três objetivos: maximizar o lucro obtido; maximizar o sequestro de carbono; e maximizar a área com florestas maduras – que contenham árvores com 100 anos ou mais. O modelo possui um horizonte de planejamento de 30 anos, com rotação de 45 anos, e é dividido em períodos de 5 anos. O modelo está sujeito a restrição de área máxima de corte, formulada segundo a abordagem *Path*. O limite imposto é de 120 acres. Outros dois modelos também foram criados. Os modelos de certificação *Forest Stewardship Council* (FSC) limita a abertura de área máxima em 60 acres, impõe também uma área máxima média de área de colheita de 40 acres, além de determinar um tempo de *green-up* de 10 anos. Já os modelos de desbaste excluem a possibilidade de corte raso, dessa forma as restrições de área são eliminadas do modelo. Nesta formulação a maximização de áreas de florestas maduras torna-se uma constante e apenas os objetivos de maximizar o lucro e o sequestro de carbono são mantidos. O algoritmo *Alpha Delta* foi utilizado para a resolução do problema. O modelo com um limite maior de área passível de corte por período foi o que apresentou maiores valores para o valor presente líquido. E os modelos de desbaste geraram os cenários com maior taxa de sequestro de carbono, pois o desbaste leva ao aumento da área disponível para as árvores, estimulando seu crescimento. Este acréscimo no crescimento vegetal pode ultrapassar a perda de carbono gerada pelo corte das árvores no cenário avaliado.

O objetivo da pesquisa desenvolvida por Martins et al. (2014), foi a elaboração de uma nova maneira de modelar o fluxo equilibrado de madeira com programação inteira. Os autores incluíram em seu modelo a restrição de área máxima com limitação, que utiliza a abordagem *Bucket*, proposta por

Constantino, Martins e Borges (2008). Quatro modelos com variações na restrição de volume e na função objetivo foram testados pelos autores. As restrições de área dos modelos possuem também restrição de volume de madeira. Para o modelo “A” a variação permitida para o *upper bound* e *lower bound* são iguais; o modelo “B” tem os limites inferiores de volume colhidos aumentados a cada período e as restrições do modelo “C” permitem que o volume colhido varie dentro de um intervalo em cada período. O quarto modelo é multiobjetivo, nele se busca maximizar o valor presente líquido e minimizar a diferença entre os volumes colhidos entre os períodos, garantindo o equilíbrio de fluxo. Para todos os modelos permite-se que um talhão seja colhido apenas uma vez no horizonte de planejamento e a duração do horizonte é menor que uma rotação. Os modelos foram testados em instâncias reais e hipotéticas. Os testes reais foram realizados com dados da Florestal Nacional Leiria, em Portugal, e da Floresta *El Dorado*, nos Estados Unidos. A área máxima utilizada foi de 40 ha, o horizonte de planejamento variou de 30 anos a 120 anos. A restrição proposta pelos autores (modelo “C”) controlou de forma mais eficiente o desvio do volume de madeira colhida, sem dificultar a resolução do modelo e apresentando menores gaps. O modelo multiobjetivo apresentou os melhores resultados em termos de VPL.

Hernandez et al. (2014), apresentam um modelo não linear de programação multiobjetivo de colheita florestal. Quatro objetivos conflitantes foram incluídos na formulação: a obtenção de uma floresta com idade balanceada; a minimização de áreas que contenham árvores mais antigas que a idade de rotação; maximização do valor presente líquido; e a maximização do sequestro de carbono ao longo do horizonte de planejamento. O primeiro objetivo do modelo é proposto pois as florestas cubanas, local de aplicação do estudo, possuem uma estrutura etária muito desequilibrada, e vai de encontro com a “Lei Florestal Cubana”, que visa regular o uso sustentável e múltiplo das florestas, promovendo o uso racional de produtos florestais. O modelo ainda inclui em sua formulação a restrição ARM, proposta por McDill, Rebain e Braze. (2002) e considera intervalos de *green-up*. Para a resolução do modelo os autores utilizam a metaheurística evolucionária SSPMO. O modelo proposto conseguiu melhorar o equilíbrio de idade em todos os casos avaliados. Os resultados

corroboraram a hipótese de que a maximização do VPL e a maximização do sequestro de carbono são objetivos conflitantes em todas as simulações realizadas, uma vez que quando um deles aumenta o outro tende a piorar.

Avaliar diferentes métodos de busca em vizinhança em um problema de planejamento florestal foi o objetivo de Borges, Eid e Bergseng (2014). O modelo utilizado pelos autores inclui pares de restrições de adjacência do tipo URM e de variação do volume colhido entre os períodos. Quatro métodos de resolução foram testados. O primeiro, o método convencional, baseado no *simulated annealing* tradicional, adota uma distribuição de probabilidade uniforme para a seleção de uma nova solução na vizinhança. O método 2 busca diversificar a busca de maneira simples, explorando soluções que possam ter sido negligenciadas ao se usar o método convencional. Nele as probabilidades associadas à cada solução de uma vizinhança são definidas levando em conta o número de alternativas de manejo em cada talhão. Para o terceiro método as probabilidades para selecionar a solução vizinha são definidas de maneira a priorizar a seleção da unidade de manejo que contenha o maior desvio padrão do VPL entre tratamentos (alternativas de manejo) dentro da unidade. Já o último método é a combinação dos métodos previamente descritos, que visa minimizar as desvantagens dos métodos anteriores, além de potencializar seus benefícios. Testes foram realizados em amostras metodológicas geradas a partir de dados do inventário nacional Norueguês. Os autores concluíram que a inserção da tendência na busca em vizinhança melhorou, de forma geral, as soluções encontradas quando comparadas com a metaheurística tradicional. No entanto, houve um pequeno aumento no tempo gasto para o processamento das soluções. Dentre as três alternativas propostas, o Método 4 (combinação dos métodos 2 e 3) obteve as melhores respostas em comparação ao método tradicional.

As restrições de adjacência ARM e URM são utilizadas em muitos casos como forma de mitigar os danos causados ao meio ambiente pelo processo de colheita florestal (BINOTI et al., 2014a), porém não são a única alternativa para tanto. Binoti et al. (2014b) propõem um modelo de regulação de florestas equiâneas com restrições ambientais. São avaliadas alternativas em que na função objetivo está incluída a minimização do índice de área colhida (IAC), e a

penalização da função objetivo como função do IAC. Os autores comparam os resultados obtidos com ele com os resultados de um modelo que considera restrições URM, sendo que um talhão é considerado adjacente a outro quando a distância entre seus limites era de 50 metros ou menos. Os resultados foram comparados também com o modelo clássico do tipo I. O estudo foi realizado com dados reais de uma fazenda experimental situada no estado de Minas Gerais, no Brasil, dividida em 135 talhões. O horizonte de planejamento do problema foi de 18 anos, com rotação de 6 anos. Considerou-se como única fonte de madeira o clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. A resolução do modelo foi feita utilizando a metaheurística algoritmo genético. O modelo incluindo as restrições de adjacência, em comparação com o modelo clássico, teve uma redução de 8% no VPL, sendo o menor resultado obtido pelos autores dentre todos os testes realizados.

Dong et al. (2015a), desenvolveram um modelo multiobjetivo que auxilia o gestor florestal no processo decisório maximizando o estoque de carbono, a produção de madeira e a agregação espacial das atividades de manejo. Os autores aplicaram o modelo aos dados de uma floresta real, localizada na região noroeste da China de aproximadamente 120.000 hectares, e três florestas hipotéticas. Entre as florestas geradas criou-se uma com padrão de idade jovem, outra com floresta mais antiga e uma considerada normal, com idade distribuída. O planejamento foi feito para um horizonte de 30 anos, dividido em três períodos de 10 anos cada. Entre as restrições incluiu-se a restrição de limite de área máxima, incluindo o talhão avaliado e seus vizinhos, caso este não atendesse ao limite imposto. A metaheurística SA (*simulated annealing*) foi utilizada para a resolução do problema. Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que a estrutura de idade inicial da floresta afeta a qualidade da resposta e o tempo de processamento do problema. A floresta hipotética madura obteve a maior média dentre as soluções no menor tempo de processamento. Para um nível fixo de colheita os autores aumentaram a densidade de carbono por hectare das quatro estruturas estudadas, maximizando a função de utilidade.

Bettinger, Demirci e Boston (2015), avaliaram os efeitos do uso da reversão durante o processo de busca de s-metaheurísticas, que tem por objetivo intensificar a busca da solução ótima de um determinado problema em

torno de uma região de ótimo local. A função objetivo do modelo utilizado busca minimizar os desvios quadrados do volume de madeira agendados para colheita de um volume alvo, em um horizonte de planejamento de 30 anos dividido em seis períodos de cinco anos. Os talhões podem ser colhidos apenas uma vez ao longo de todo horizonte, e caso um talhão seja adjacente a um vizinho em que será realizada a colheita, este não poderá ser colhido, independentemente da área, logo o modelo utiliza em sua formulação restrições do tipo URM.

O modelo foi aplicado em uma floresta hipotética de 1841 ha, dividida em 87 talhões baseada no mapa de uma floresta localizada na região oeste do Oregon, Estados Unidos. Foram considerados talhões vizinhos aqueles que dividiam pelo menos um lado em comum, gerando ao todo 210 relações de adjacência. Duas metaheurísticas de busca foram refinadas com o processo de reversão: busca tabu (BT) e o algoritmo *threshold accepting* (TA); e um algoritmo que utiliza a reversão na sua concepção: *raindrop method*. Para a BT e o TA também foram testadas diferentes opções de movimentação n-opt: 1-opt, 1-opt e 2-opt e por fim 1-opt, 2-opt e 3-opt. O pior resultado foi obtido pelo método *raindrop* com taxa de reversão de 0 iterações, ou seja, sem o processo de reversão, resultado esperado pois o algoritmo não funciona bem sem ela. Os autores concluíram que a reversão melhora a qualidade das soluções geradas pelos algoritmos e a taxa de reversão é um fator importante, que merece atenção, pois pode afetar a qualidade da solução (BETTINGER; DEMIRCI; BOSTON, 2015).

Kašpar, Marušák e Hlavatý (2015) apresentaram um modelo multiobjetivo que contempla decisões relacionadas a questões ambientais e econômicas. Ao todo três objetivos foram inseridos no planejamento: a maximização da madeira colhida, minimizar o perímetro de reservas de florestas maduras, e minimizar a quantidade de madeira disponível nas áreas de florestas maduras. Ou seja, o modelo busca maximizar o volume de madeira colhida e otimizar a área de floresta madura, essencial para a manutenção da fauna local. É importante que esta região não seja nem muito estreita nem tão longa, sendo preferencial que o formato seja semelhante a um círculo.

Os autores acima ainda afirmaram que o modelo exige ainda, entre suas restrições, que talhões adjacentes não sejam colhidos em um mesmo período. O modelo foi aplicado em uma floresta de 178 hectares, dividida em 363 talhões,

com horizonte de planejamento de 30 anos, dividido em três períodos de 10 anos cada. Os resultados obtidos foram comparados às soluções alcançadas por um modelo com o objetivo de maximizar a colheita de madeira apenas, que também contém entre suas restrições o impedimento de colher talhões vizinhos. As soluções foram obtidas utilizando o Gurobi 5.5.0. O volume colhido de madeira foi menor no modelo proposto em comparação ao modelo que considera apenas a maximização da madeira colhida, uma vez que não existe a demanda em se manter uma área intacta. Os resultados demonstraram ainda que quanto maior a diferença de fluxo de madeira colhida permitida menor é a área não manejada e maior a área em que ocorre a derrubada de madeira.

John e Tóth (2015) propuseram um modelo de planejamento de colheita espacialmente explícito como alternativa aos modelos do tipo I e do tipo II, chamado pelos autores de modelo tipo IV. O novo modelo utiliza equações diferenciais e álgebra booleana para realizar a transição dos estados dos talhões ao longo do tempo. O modelo IV, diferentemente dos modelos I e II, trata atributos unitários, tal qual a receita obtida com a colheita, como variáveis e as calcula durante o processo de otimização.

Os autores supra citados demonstraram matematicamente a compatibilidade do novo modelo com restrições espaciais de adjacência do tipo ARM em três formulações: *path*, *cluster packing* e *bucket* e aplicaram duas em testes. Três conjuntos de testes foram realizados, aplicando o modelo proposto e os modelos I e II. O primeiro em uma floresta de *Pinus radiata* com 6.132,6 hectares localizada na Nova Zelândia. Nesta primeira floresta não existem restrições relacionadas a limites de área de corte, uma vez que não existe regulamentação por parte do governo neozelandês. A segunda foi uma floresta de 4.884 ha de *Pinus taeda* localizada na região sudoeste dos Estados Unidos. Neste cenário existe a restrição de abertura de no máximo 97 hectares e a limitação de abertura média de 48,5 hectares. Para lidar com estas restrições os autores utilizaram a abordagem *cluster packing* da formulação URM.

A última floresta, El Dorado, localiza-se na Califórnia, Estados Unidos, também está sujeita à limitação de 48,5 ha de abertura máxima permitida. Neste cenário utilizaram a formulação *path* para trabalhar com a restrição espacial de adjacência. O horizonte de planejamento utilizado em todos os cenários foi de 25 anos, divididos em cinco períodos de cinco anos. A resolução dos modelos

foi realizada com o *solver* CPLEX 12.1.0. Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que o novo modelo possui desempenho computacional semelhante aos modelos tipo I e II, incluindo também preocupações importantes da modelagem como decisões intermediárias de tratamento e restrições máximas e médias de área, graças a sua formulação (JOHN; TÓTH, 2015).

Zengin et al. (2015), propuseram um modelo multiobjetivo que maximiza o volume de madeira colhida e a produção de água, incluindo na formulação restrições de adjacência do tipo URM. A inclusão de fatores hidrológicos no modelo é realizada pois o processo de evapotranspiração responde a estratégias de manejo aplicadas a florestas. O modelo foi aplicado na floresta de Belgrado, localizada na Turquia, com horizonte de planejamento de 100 anos, dividido em 10 períodos de 10 anos. Após a construção do modelo principal, quatro estratégias, com a mudança das restrições utilizadas, foram testadas. As duas primeiras estratégias possuem o mesmo objetivo do modelo principal, mas diferem entre si nas restrições impostas. O primeiro não impõe equilíbrio no fluxo de madeira ao longo do horizonte de planejamento, e estabelece o limite de corte raso em no máximo 320 ha por período, no entanto não utiliza restrição de adjacência.

O segundo, assim como o primeiro, não utiliza a restrição URM, porém, impõe o equilíbrio do fluxo de madeira e determina que a produção de água em cada período seja maior que 10 milhões de metros cúbicos. As duas últimas estratégias têm sua função objetivo alterada, considerando apenas a maximização da produção de água, além disso, incluem também a restrição de adjacência. A estratégia três assim como a segunda, controla o equilíbrio do fluxo de madeira e impõe um volume mínimo de 10 milhões m<sup>3</sup> de água produzido por período. Já a estratégia quatro não incorpora o equilíbrio do fluxo de madeira, impõem que a produção de água seja maior que 16 milhões m<sup>3</sup> por período. Entre as estratégias avaliadas a que gerou o maior volume de madeira colhida ao final do horizonte de planejamento foi a estratégia um, com um total de 988.367 m<sup>3</sup>. Já a estratégia três garantiu o maior volume de água produzido (163,4 milhões m<sup>3</sup>), com o segundo maior volume de madeira colhido (939764 m<sup>3</sup>) (ZENGIN et al., 2015).

Dong et al. (2015b), compararam a eficiência das técnicas de busca em vizinhança, 1-opt e 2-opt, da metaheurística SA (*simulated annealing*) em



problemas de planejamento de colheita florestal espacial. O modelo utilizado tinha por objetivo maximizar o VPL (Valor Presente Líquido) das atividades florestais com penalizações caso as metas de volume não fossem atendidas, nos 30 períodos do horizonte de planejamento, com cada um período possuindo um ano. Três alternativas do modelo foram apresentadas. A primeira não considerava restrições de adjacência, a segunda utilizava restrições do tipo URM com tempo de *green-up* de dois anos e a terceira restrições ARM com o mesmo período de *green-up*. Quatro florestas hipotéticas foram criadas e uma base de dados real de uma floresta localizada na China, foram utilizadas para a realização dos testes. As florestas hipotéticas geradas com diferentes perfis de distribuição de idade, sendo uma floresta jovem, uma normal, uma madura e uma espacialmente organizada. Os autores constataram que o movimento 2-opt, por intensificar a busca, produz resultados melhores em termos de valores máximos e médios das soluções e reduz o desvio padrão dos conjuntos de soluções.

Um sistema de suporte a decisão (SSD), chamado *Optimal*, foi desenvolvido por Marušák, Kašpar e Vopěnka (2015). O sistema foi criado e aplicado em sistemas de manejo de corte raso e *shelterwood* levando em conta aspectos ambientais e econômicos. Ele possui os principais componentes de um sistema de apoio à decisão: o sistema de gerenciamento de base de dados, em que é possível utilizar todas as bases de dados compatíveis com o ArcGis; o modelo de prognose florestal; e um modelo de otimização para o agendamento da colheita espacial. A função objetivo do modelo de otimização utilizado pelo sistema busca maximizar o volume de madeira colhida ao longo do horizonte de planejamento estabelecido em 30 anos, dividido em três períodos de 10 anos.

Estes autores ainda afirmaram que o modelo possui em sua formulação restrições que garantem o equilíbrio do fluxo de madeira e restrições de adjacência do tipo URM. A construção da matriz de adjacência pode ser realizada de acordo com as condições de vizinhança de Neumann ou Moore. O sistema foi utilizado em uma floresta de 494,8 hectares localizada na República Tcheca e permite a edição dos talhões. Diferentes variações foram testadas, a primeira incluindo apenas restrições de adjacência (AdC), a segunda apenas com restrições de fluxo de madeira (HfC) e uma última incluindo ambas as restrições (ComP). Entre os modelos de adjacência (AdC) e as diferentes



alternativas do modelo ComP, a versão que utiliza a matriz de vizinhança de Neumann obteve o maior volume de madeira colhida ao final do horizonte de planejamento em todos os testes.

Os impactos na lucratividade e na disponibilidade de biomassa, causados pela inclusão da restrição ARM no planejamento de uma floresta na região de Oslo, Noruega, foram avaliados por Borges et al. (2015). A região estudada possui 15.538 ha, sendo 12.084 ha de floresta produtiva. Quatro versões do problema, cuja função objetivo foi a maximização do VPL, foram avaliadas. A primeira versão, sem restrições (Nc), impôs apenas que apenas um tratamento fosse designado para cada talhão. O modelo dois promove o controle do volume colhido (Ch), não permitindo a flutuação do volume colhido entre períodos maior que um determinado limite. O terceiro modelo (ChOg) é uma extensão do segundo, pois, além de impor o controle do fluxo de volume de madeira, também demanda a existência de uma porcentagem mínima de floresta antiga em todos os períodos. O último modelo (ChOgOa) além das restrições incluídas nos modelos 2 e 3 possui restrições de área máxima (ARM). A abordagem utilizada pelos autores permite o uso de diferentes períodos de *green-up* e considera indiretamente o índice de sítio dos talhões. A inclusão da restrição de adjacência causou a redução do VPL em 7% em relação aos modelos três e dois e quando comparado ao modelo sem restrições (Nc) o modelo ChOgOa teve uma redução de 21,8% no VPL.

Bachmatiuk et al. (2015), avaliaram a *performance* da heurística SA com a mudança no número de movimentações realizadas em cada iteração, na resolução de um problema de colheita florestal formulados seguindo o modelo tipo I. Três alternativas de modelo foram testadas. O primeiro incluindo restrições de equilíbrio de fluxo. O segundo incorporando restrições de estoques finais de madeira e de carbono. Já o último modelo, além de todas as restrições anteriores, incluiu também a restrição ARM formulada segundo a abordagem *Path*. Os resultados obtidos pela heurística foram comparados aos encontrados pela solução obtida com a resolução do modelo exato solucionado pelo *solver* CPLEX. O problema buscou maximizar o VPL de uma floresta de eucalipto localizada em Portugal, contendo 1000 talhões, em um total de 11873 ha. Dois experimentos foram formulados, um contendo 30 períodos de um ano,

totalizando um horizonte de planejamento de 30 anos, e um menor, com 15 anos de horizonte de planejamento.

Os autores incrementaram a quantidade de movimentos realizados pela heurística, partindo da abordagem clássica 1-opt, até a 3-opt, em que três talhões tiveram a posição alterada em uma mesma iteração. Além dos movimentos, os autores também avaliaram o efeito causado na resposta, por diferentes valores de parâmetro de resfriamento e de temperatura inicial da heurística. Para o primeiro experimento, com maior número de períodos, o movimento 1-opt obteve os melhores resultados em comparação aos demais movimentos em todos os modelos testados, e a maior temperatura inicial foi a que também gerou os melhores resultados para os três modelos neste experimento. No entanto, para o experimento dois, o movimento 2-opt alcançou os melhores resultados. Problemas de menor tamanho e com menor número de restrições foram facilmente resolvidos pelo método exato, porém, ao aumentar a complexidade do problema a metaheurística se destacou frente ao modelo exato consumindo menor capacidade computacional e alcançando soluções em instâncias não solucionadas pela alternativa exata.

Wei e Murray (2015) apresentaram dois modelos multiobjetivos, ambos com restrições URM, que visam entender os efeitos da incerteza espacial na colheita florestal. A incerteza espacial no âmbito da colheita florestal diz respeito a precisão na definição dos limites dos talhões. Uma vez que modelos URM restringem o corte de talhões adjacentes simultaneamente a incerteza na precisão das fronteiras de um talhão pode vir a identificar talhões não adjacentes como tal.

O primeiro modelo proposto teve por objetivo maximizar benefícios, podendo ser benefícios ambientais ou econômicos, como a maximização do VPL, e minimizar o risco total de relaxar as restrições de proximidade espacialmente incertas. Já o segundo também buscou a maximização dos benefícios da floresta, porém, minimizando o risco total de relaxar potenciais restrições de adjacência de um talhão. No primeiro modelo cada par de restrições de adjacência está associado a um risco, enquanto o modelo dois se concentra em um talhão e todo o conjunto de adjacências potenciais a ele relacionado. Os modelos foram implementados em *Python* e solucionados utilizando o *solver* comercial Gurobi. Os testes foram realizados utilizando como

base dados de uma floresta localizada na região norte da Califórnia. O resultado obtido pelo modelo que considera a formulação tradicional URM obteve como resultado 5854,25 de retorno econômico. O modelo um resultou em um retorno de 5571,62 sem riscos de violação e o modelo dois obteve o maior resultado, 6876,95 com 387 riscos de violação (WEI; MURRAY, 2015).

Liu e Lin (2015) propuseram um algoritmo cultural para a resolução do planejamento de colheita florestal cujo objetivo foi maximizar o volume de madeira ao longo do tempo. O modelo impede que talhões adjacentes sejam colhidos em um mesmo período. Além da restrição URM, apenas talhões que contenham árvores com idade superior a 90 anos podem ser cortados e o volume colhido durante os períodos deve ser o mais equilibrado possível.

Segundo estes autores, algoritmos culturais são uma classe dos algoritmos evolucionários baseadas em teorias sociais e arqueológicas, em que a evolução cultural é vista como herança passada de uma população para seus descendentes e este conhecimento adquirido orienta o comportamento dos indivíduos. O algoritmo proposto começa com a criação indivíduos aleatórios na população inicial. O *fitness* de cada indivíduo da população inicial é avaliado e o espaço de crença é inicializado. Este espaço possui influência situacional e normativa sobre a população. A cada iteração o espaço populacional é ajustado tanto por operações evolucionárias (seleção, reparação, crossover e operações de balanceamento) e por operações de exploração culturais (sequenciamento, intercâmbio e mutação). O operador de sequenciamento, considerado o mais destrutivo dentre os operadores de exploração, encontra de maneira arbitrária duas partições de períodos vizinhos e troca todos os genes desta partição.

O operador de intercâmbio faz a troca entre dois genes de duas partições de períodos diferentes. Já o operador de mutação move um gene de uma partição de período para outra. Caso as restrições de idade mínima de corte e de adjacência forem violadas pelos movimentos realizados por estes dois últimos operadores as trocas não são executadas. Os resultados obtidos foram comparados pelo algoritmo proposto com os alcançados com a resolução do problema com a metaheurística SA e obtiveram resultados melhores com a nova abordagem de resolução (LIU; LIN, 2015).

Kadioğullari et al. (2015), simularam modelos de planejamento espacial de colheita utilizando o modelo *ETÇAPSimülasyon* do sistema de apoio à

decisão ETÇAP, com o objetivo de examinar os efeitos de quatro estratégias de manejo espaciais e uma estratégia sem restrições espaciais e seus efeitos a longo prazo na estrutura da floresta. O modelo utilizado pelo SSD é determinístico, ou seja, riscos biológicos, econômicos e ecológicos não são levados em consideração. A floresta, objeto de estudo, localiza-se em uma região de montanhas no oeste da Turquia, com 12265 ha, dos quais 8234 ha são áreas de floresta, divididos em 1596 talhões de aproximadamente 5.15 ha cada. As estratégias se diferenciaram em função do tamanho máximo de abertura permitido, tamanho mínimo de bloco, distância de adjacência e distância proximal, ou seja, a distância limite para considerar dois blocos adjacentes ou duas áreas máximas no caso da distância proximal, período de *green-up* e tamanho de bloco desejado. O modelo buscou maximizar o volume de madeira colhido e considerou também o desbaste da floresta. O modelo sem restrições espaciais foi o que gerou o maior volume de madeira ao longo do horizonte de planejamento avaliado, seguido da estratégia que considerou uma distância de adjacência e proximal de 25 metros, sendo uma forma de relaxação do problema pois compensou a limitação de área máxima permitida pela estratégia de 50 ha, a menor dentre as cinco estratégias.

Kášpar, Marušák e Bettinger (2016), não testaram os efeitos do uso das restrições espaciais em seu trabalho. Ao invés disso compararam a eficiência em termos de tempo de processamento ao utilizarem dois conceitos diferentes de representação de adjacência. O que os diferencia é a estrutura de armazenagem de dados e o algoritmo adequado para a criação das restrições. Os conceitos estudados foram: o desenvolvimento de restrições *pairwise* a partir de uma lista de adjacências, e o desenvolvimento de uma matriz de adjacência utilizando três algoritmos analíticos baseados em operações de álgebra linear simples.

Foi utilizado um modelo matemático de colheita florestal de baixa complexidade, em que as restrições de adjacência variaram de acordo com o conceito utilizado. Para a criação dos pares de restrição não foi necessário um tipo específico de algoritmo. Já para a matriz de adjacência três algoritmos baseados na simetria da matriz foram utilizados. O primeiro, baseado na simetria diagonal da matriz original, gera a matriz de adjacência triangular (TAM). O segundo algoritmo parte da premissa que linhas redundantes da matriz original

podem ser deletadas, criando a matriz de adjacência de linhas (RAM). O último algoritmo leva a criação da matriz de adjacência triangular de linhas (RTAM), que é a combinação dos dois métodos anteriores. Amostras metodológicas foram criadas para a pesquisa (KAŠPAR; MARUŠÁK; BETTINGER, 2016).

O problema foi resolvido utilizando o solver Gurobi® 6.0.5. Os autores acima concluíram que a redução do número de restrições geradas pelos algoritmos testados pode diminuir a eficiência dos resultados obtidos pelo *branch and bound*. Comentaram ainda que a redução na quantidade de restrições não é necessária, pois, os *solvers* disponíveis atualmente não possuem limitação quanto ao número de restrições. Ademais, as restrições tradicionais obtiveram um resultado melhor na resolução do agendamento da colheita considerando restrições espaciais.

Diversos artigos que tratam do uso das restrições espaciais de adjacência utilizam o modelo tipo I como base de sua formulação. Em modelos do tipo I a variável de decisão representa um regime de manejo designado para cada área (unidade de manejo), que permanecerá até o final do horizonte de planejamento, gerando maior identidade para a unidade de manejo (RODRIGUES et al., 2006). Já no modelo tipo II a variável de decisão corresponde ao total de área plantada no período *i* que será cortada no período *j*, assim em cada novo período os talhões podem ser reagrupados gerando a perda de identidade das unidades de manejo (LIMA, 1988).

McDill et al. (2016), compararam os modelos do tipo I e tipo II (JOHNSON; SCHEURMAN, 1977) em problemas com restrição de área, a fim de avaliar se o modelo tipo II possui potencial em aumentar os ganhos de eficiência na resolução dos problemas. A formulação *Path*, proposta por McDill, Rebain e Braze (2002), foi utilizada como referência para escrever as restrições de adjacência. A formulação *Path* demanda a identificação de cada grupo de talhões contíguos cuja área combinada exceda de forma limítrofe área máxima permitida, isto é, se qualquer talhão for retirado do grupo a combinação das áreas dos talhões restantes do grupo ou todas as áreas dos subgrupos remanescentes não irão exceder o limite imposto. Os autores testaram as diferentes formulações em 10 problemas reais e 150 problemas hipotéticos, que foram resolvidos utilizando o IBM ILOG CPLEX® 12.1.0. Os resultados obtidos mostraram que o tamanho do horizonte de planejamento foi o fator determinante

ao compararem a eficiência entre os dois modelos. A formulação do tipo I foi superior nas instâncias cujo horizonte de planejamento era menor ou igual a uma rotação, porém com o aumento do tempo de planejamento o modelo tipo II obteve melhores resultados, mesmo gerando um número maior de restrições e variáveis.

Yoshimoto e Konoshima (2016) utilizaram o modelo tipo I como base para formular o problema de colheita florestal com múltiplos cortes e restrições de adjacência (URM). A restrição *green-up*, que para este estudo, impede que um talhão adjacente a um talhão colhido seja derrubado por um período determinado, também está presente na formulação do problema. O modelo foi formulado como um problema de programação inteira binário. A restrição de adjacência foi gerada através do produto de Kronecker de duas matrizes de adjacência. A primeira a tradicional matriz espacial de adjacência de localização do talhão. E a segunda, é a matriz de adjacência de atividade, para identificar tarefas de colheita simultâneas em um conjunto de tratamentos possíveis para um talhão. Os autores observaram que a proposta do uso da álgebra matricial, atender aos requisitos de *green-up* se tornaram mais fáceis, apenas mudando elementos da matriz, sem a necessidade de adicionar novas variáveis.

Os efeitos na produtividade causados pelas restrições do tipo ARM e *green-up* foram testados por Borges et al. (2016). Foram apresentadas três formulações para definir os requisitos de *green-up*. Todas foram baseadas na abordagem *green-up* dinâmica. Nesta uma área aberta possui unidades de manejo que podem ter sido colhidas em diferentes períodos de planejamento. Dessa forma, mesmo que o período de *green-up* seja o mesmo para todos os talhões a área aberta muda ao longo do tempo (BORGES et al., 2016). As alternativas propostas para a restrição foram: comprimento predefinido de tempo de *green-up* fixo; tempo variável predefinido de *green-up*; e informação de altura das árvores gerada pela simulação de crescimento. Segundo os autores os resultados que obtiveram o maior valor presente líquido foram as instâncias que permitiam tempo variável para o *green-up* e que recebiam como entrada as alturas geradas pelo simulador de crescimento. Esta última alternativa foi a que obteve as soluções mais rapidamente em comparação as demais formulações, além de sempre encontrar as soluções ótimas.

Troncoso, Weintraub e Martell (2016), desenvolveram um índice de ameaça de incêndio, a nível de talhão e o incorporaram em um modelo de programação inteira mista sujeito a restrições de adjacência, com o objetivo de determinar estratégias que maximizassem o volume colhido de florestas com potencial para incêndios. O índice desenvolvido pelos autores foi inserido na função objetivo do modelo que auxiliava na identificação de blocos com grande volume e que possuíam grande probabilidade de pegar fogo, acelerando a decisão por colhê-los e dessa forma minimizar o risco de incêndio florestal. Uma vez que foi assumido como premissa para o problema que o fogo não pode iniciar ou se espalhar em talhões já colhidos. O horizonte de planejamento do problema proposto foi de 50 anos, dividido em cinco períodos de 10 anos cada. O modelo incluía a restrição de unidade (URM), e para testá-lo foram geradas amostras metodológicas. Os autores obtiveram um ganho de 1% no volume colhido com a inserção do índice de ameaça de incêndio na função objetivo, a área restante, a área queimada foi reduzida em 18% e o volume remanescente sem queimar aumentou em 19%.

Dong et al. (2016) utilizaram na formulação de seu problema ambas as restrições espaciais de adjacência, URM e ARM, acrescidas, ainda, de um período de três anos de *green-up*. Os períodos de planejamento estudados foram de um ano, sendo inserido horizonte de planejamento tático. O objetivo dos autores foi avaliar técnicas de busca do algoritmo *simulated annealing* na resolução de problemas espaciais de agendamento de colheita. Seis estratégias foram testadas pelos autores, sendo cinco desenvolvidas por eles. A primeira utilizada como comparação das demais técnicas foi a busca convencional que utiliza o movimento 1-opt. A segunda estratégia, de busca em vizinhança, utiliza o movimento 2-opt alterado, em que o período de colheita designado e a prescrição de manejo de dois talhões são alteradas, e não trocadas, simultaneamente. A estratégia três é uma heurística híbrida, que oscila entre o processo de busca 1-opt e a 2-opt alterada. A quarta estratégia, de maneira similar à terceira, também oscila entre os movimentos 1-opt e 2-opt. No entanto, o período de colheita designado e a prescrição de manejo de dois talhões trocados. A quinta estratégia utiliza a técnica de busca em reversão como processo de busca. A estratégia tem início com o movimento 1-opt para diversificar a busca, a melhor solução é armazenada, o movimento 2-opt alterado



é aplicado e o processo de busca retorna para o movimento 1-opt. A última estratégia é similar a quinta, porém utiliza o movimento 2-opt descrito na quarta estratégia. A capacidade computacional de demanda com as novas heurísticas foi significativamente maior do que a técnica de busca convencional, porém os resultados obtidos por estas foram melhores.

Liu, Lin e Su (2017) propuseram um problema de planejamento florestal que considera na sua formulação o desbaste e o comércio de carbono. O objetivo dos autores foi conseguir planejar a programação anual de desbaste de forma que tanto volume total de madeira colhida quanto o lucro obtido com o mercado de carbono fossem maximizados, respeitando, porém, a restrição de adjacência imposta pelo modelo proposto. Esta restrição impõe que, caso duas unidades de manejo dividam um mesmo limite, ou ponto geográfico, estas não poderão ser desbastadas no mesmo período.

Estes autores apresentaram um modelo matemático para a resolução do problema, que foi capaz de solucionar exemplos de pequena escala. Para resolver problemas maiores, Liu, Lin e Su (2017), utilizaram uma abordagem melhorada da heurística *Simulated Annealing (Improved Simulated Annealing Approach – ISA)*. Esta abordagem faz buscas iterativas por uma solução próxima ao ótimo através de buscas espaciais locais e buscas em vizinhança. As simulações feitas para avaliar o novo algoritmo se mostraram superiores ao *simulated annealing*. Além disso, a inclusão do comércio de carbono nas decisões do modelo se mostrou vantajosa para a sustentabilidade dos recursos florestais.

A pesquisa de Akbulut et al. (2017) teve por objetivo avaliar se o uso de soluções iniciais em heurísticas com soluções geradas por um modelo de programação linear relaxada, levaria à melhores planos de manejo para florestas. Os resultados obtidos pelos autores foram comparados com os resultados alcançados com o uso de soluções iniciais aleatórias. Dois modelos foram propostos para o estudo, o primeiro refletia a realidade das florestas do oeste dos Estados Unidos, na região do Oregon. Estas florestas são compostas em sua maioria por abetos de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) e western hemlock (*Tsuga heterophylla*), ambas espécies coníferas nativas da região.

O modelo ocidental possui horizonte de planejamento de 30 anos, dividido em períodos de cinco anos, que correspondem também ao tempo de *green-up*



requerido. O estado do Oregon limita as áreas de corte raso em 120 ac, o equivalente a 48,6 ha. A restrição ARM foi incluída para suprir esta demanda legal. Maximizar o fluxo contínuo de madeira colhida foi o objetivo deste modelo. O segundo modelo, retrata a realidade de florestas da região da Carolina do Sul, no sul dos Estados Unidos, em que a espécie dominante da plantação é *Pinus taeda*. Não existe lei que imponha limitações com relação à área máxima de corte raso permitida na Carolina do Sul, porém os autores também a utilizaram a restrição ARM, com o mesmo limite de área do modelo ocidental na região sul, pois essa é uma métrica comum em sistemas de certificação florestal (AKBULUT et al., 2017).

Este segundo modelo possui horizonte de planejamento de 20 anos, com períodos de um ano, típicos em planejamentos táticos da região, com períodos de *green-up* de três anos. O objetivo do modelo sulista é maximizar o VPL. Ambos os modelos foram formulados como modelos do tipo I. Ao todo 18 cenários foram criados, em que se modificou o método de conversão da solução linear relaxada para uma solução factível inteira para a heurística. Duas heurísticas de busca foram utilizadas, busca tabu e *threshold accepting*. Após inúmeros testes os autores concluíram que a estratégia de usar soluções iniciais oriundas de relaxações lineares não gera, necessariamente, respostas com qualidade maior que as obtidas com sementes aleatórias (AKBULUT et al., 2017).

Yoshimoto, Asante e Konoshima (2017), propuseram uma nova abordagem para a tarefa de agregar talhões, em modelos de restrição de área, a fim de modelar o agendamento de colheita que permita múltiplos cortes, utilizando programação inteira compacta. A abordagem apresentada fez com que um conjunto de candidatos para agregação dos talhões fosse conhecido antes da otimização, com o objetivo de encontrar o padrão ótimo dentre o conjunto de candidatos ao longo do horizonte de planejamento. Testes foram realizados utilizando dados obtidos da região de Kochi, no Japão. Para a resolução do modelo o solver comercial CPLEX foi utilizado. Os resultados obtidos pelos autores validaram a utilização da abordagem para a resolução do agendamento de colheita com múltiplos cortes rasos. Ademais, os pesquisadores ressaltaram que a abordagem pode ser adaptada não apenas para melhorar a eficiência do manejo, mas também para objetivos ambientais.

Por exemplo, alterando as regras para a criação dos candidatos para gerar conectividade de regiões para manutenção da fauna local.

Uma nova abordagem *branch-and-bound* foi proposta por Neto et al. (2017), para a resolução de problemas de agendamento da colheita florestal que inclui em sua concepção restrições de corte raso e área nuclear. Utilizaram a formulação ARM do tipo *Cluster*. Os autores testaram a abordagem em florestas variando de 32 a 1363 talhões, localizadas nos Estados Unidos e Canadá. Os horizontes de planejamento variaram de três a oito períodos, os quais variam de cinco a 10 anos cada. A resolução dos modelos foi realizada com o auxílio do solver CPLEX, implementados com a linguagem *Python*. O principal objetivo foi testar a qualidade das soluções obtidas em bons tempos de resolução. O principal objetivo foi testar a qualidade das soluções obtidas em bons tempos de resolução. Os autores definiram duas horas como limite para o tempo de resolução. O método foi capaz de encontrar boas respostas inclusive para instâncias maiores.

Qin, Dong e Huang (2017), propuseram um modelo multiobjetivo para avaliar os efeitos dos preços do carbono na relação existente entre o planejamento da colheita florestal, considerando restrições espaciais e o mercado de carbono. O modelo possuía entre suas restrições a restrição ARM, que limita a área máxima permitida para colheita em um período. Os autores aplicaram o modelo desenvolvido em uma floresta chinesa, com horizonte de planejamento de 30 anos, divididos em três períodos de 10 anos cada. A resolução do modelo foi feita utilizando o algoritmo SA. Os valores mínimos encontrados pelos autores para que a utilização de florestas para a captação de carbono seja economicamente atrativa giraram em torno de ¥ 800/ton. Os preços correntes para a época de avaliação não apresentaram efeitos relevantes na otimização quando comparados ao modelo que considerava preço zero.

Os reflexos gerados pelo uso de restrições de adjacência no planejamento da colheita sob a população de renas, foram avaliados por Cyr et al. (2017). Estes autores também simularam o desenvolvimento da rede viária florestal, pois também são responsáveis por impactos causados à espécie. O estudo foi aplicado na floresta boreal canadense. O risco de incêndios florestais, importante fator para a área estudada foi, também, simulado. O modelo de abastecimento de madeira proposto utilizava em sua formulação a restrição URM, em que as

áreas operacionais são conhecidas *a-priori*. O modelo conta também com restrições de *green-up*. O modelo matemático foi resolvido utilizando a metaheurística SA e programação linear. O algoritmo *simulated annealing* foi utilizado para encontrar o melhor cronograma de colheita das áreas e o método exato, aplicado após a metaheurística, maximizou o volume colhido de madeira. O uso das restrições espaciais de adjacência resultou em impactos marginais na conservação da população de renas.

Caglayan et al. (2018), propuseram um modelo de programação linear inteira mista para realizar o planejamento das atividades de colheita, em uma floresta de carvalhos de 3.448,8 ha localizada na região norte da Turquia, auxiliando no processo de conversão de regimes de talhadia para alto fuste. Quatro estratégias de planejamento foram propostas para estimar o período de regeneração mais apropriado. Este período é o intervalo de tempo em que existe uma maior abundância de sementes, fator importante para o processo de conversão entre os regimes. O limite mínimo para o período de maturidade de sítios classe II foi definido pelos autores em 40 anos e em 60 anos para sítios classe III.

A estratégia 1 tinha por objetivo maximizar a produção de madeira em metros cúbicos, durante o horizonte de planejamento, estabelecido em 100 anos para todas as estratégias, e não possuía restrições especiais. A segunda estratégia incluiu restrições espaciais de adjacência, em que não é permitido realizar a colheita de mais de três talhões vizinhos em um mesmo período, ou seja, é possível fazer o agrupamento dos talhões em *clusters*, sendo desta forma uma abordagem da estratégia ARM. A estratégia 3 não incluiu restrições de adjacência, porém levou em consideração a formulação e o controle do fluxo de madeira colhida. Por fim, a estratégia 4 contou tanto com o controle do fluxo de colheita quanto com a restrição de área. O modelo permitiu que a conversão do regime de talhadia para floresta de alto fuste fosse alcançada dentro do horizonte de planejamento definido através da regeneração natural e que a produção de madeira fosse otimizada. A estratégia sem restrições foi a que alcançou o melhor resultado em termos de volume de madeira colhida, e as estratégias que continham a restrição ARM (estratégia 2 e 4) tiveram desempenho semelhante, mesmo com a restrição de equilíbrio de fluxo, indicando a maior influência da limitação imposta pelas adjacências ao modelo (CAGLAYAN et al., 2018).

Ampliar o arcabouço de conhecimento sobre o equilíbrio entre a produção de madeira e o sequestro de carbono foi o objetivo de Dong, Lu e Liu (2018). Os autores estudam os efeitos de restrições econômicas e ambientais na produção de carbono e madeira, em quatro alternativas de planejamento de manejo em uma floresta localizada na região nordeste da China. As estratégias propostas pelos autores foram: estratégia de manejo direcionada ao carbono (*Carbon Management Strategy* - CMS), estratégia de manejo centrada na produção de madeira (*Timber Management Strategy* – TMS), estratégia de manejo multiobjetivo (*Multiobjective Management Strategy* – MMS), e por fim, a estratégia de manejo de restrição de recursos (*Resource Restricted Management Strategy* – RMS). Quatro variantes de cenários foram criadas para cada estratégia.

O objetivo dos cenários criados para a alternativa CMS foi maximizar o VPL do sequestro de carbono, enquanto para a estratégia TMS buscou-se maximizar o VPL da produção de madeira. A terceira alternativa (MMS) teve por objetivo maximizar o VPL tanto da produção de madeira quanto do sequestro de carbono. A estratégia RMS também visava maximizar o VPL da produção de madeira e do sequestro de carbono, porém submetida a metas mínimas de sequestro de carbono. Dois dos cenários das estratégias CMS, TMS e MMS possuíam também restrições do tipo ARM, com variação do tempo de *green-up* estabelecido. O modelo possuía horizonte de planejamento de 50 anos, dividido em 10 períodos de cinco anos (DONG; LU; LIU, 2018).

A resolução do problema foi realizada com auxílio da metaheurística SA. Os testes realizados pelos autores (DONG; LU; LIU, 2018) mostraram que, para o estudo de caso, o preço simulado do mercado de carbono que apresentou o melhor nível de equilíbrio entre a produção de madeira e o sequestro de carbono foi o de \$100,00. Ademais, os autores também observaram que a inserção da restrição de adjacência com tempo de *green-up* equivalente a dois períodos provocou a redução do VPL em aproximadamente 17,87% para a estratégia TMS e de 15,53% para a MMS em comparação aos cenários que não possuíam tal restrição.

Uma nova abordagem de resolução do planejamento da colheita florestal com restrições de área foi proposta por Yoshimoto e Asante (2018). O método MF-Model I soluciona o planejamento da colheita através do conceito do

problema do fluxo máximo. O modelo proposto não necessita de regras definidas *a priori* para a criação ou preparação de *clusters*. A agregação dos talhões é realizada com a ideia de fluxo máximo, em que a área de cada talhão corresponde ao fluxo em cada unidade. As conexões de adjacência entre talhões vizinhos são os arcos do grafo. Todos os talhões são conectados à um *super* nó artificial, de forma que as restrições de fluxo máximo são formuladas para encontrar o melhor conjunto de talhões impondo uma área máxima, ou seja um fluxo máximo.

Após a definição dos conjuntos o modelo garante a conexão total de todos os talhões agregados, pois caso estejam conectados estarão sujeitos a um mesmo regime de manejo. O modelo permite múltiplas derrubadas ao longo do horizonte de planejamento com o uso de intervalos de *green-up*. Todas estas questões temporais e espaciais são integradas por um componente do modelo. O método foi testado em dois mapas hipotéticos e em dados das florestas *Shulkell*, localizada na província canadense da Nova Escócia, e na floresta *El Dorado*, situada no estado da Califórnia, Estados Unidos (YOSHIMOTO; ASANTE, 2018).

A abertura máxima permitida para as florestas hipotéticas e *El Dorado* foi de 50 ha, enquanto para *Shulkell* limitou-se a 20 ha. O horizonte de planejamento dos cenários avaliados era composto de 15, 25 e 50 anos, com períodos de cinco anos. O intervalo de *green-up* para as instâncias de 15 e 25 anos foi de um período, já na instância de 50 anos testou-se o efeito de intervalos de 1, 2 e 3 períodos. A solução para os testes foi obtida com o *solver* CPLEX 12.7.0. Os resultados obtidos foram comparados com os valores alcançados pelas abordagens *Path* e *Bucket*. O modelo proposto superou a formulação *Bucket* em todos os 18 cenários avaliados e a abordagem *Path* em 10. O modelo foi superior a todas as abordagens a que foi comparado quando se fez uso de intervalos de *green-up* de duas a três períodos (YOSHIMOTO; ASANTE, 2018).

Silva et al. (2018) apresentaram um modelo matemático para a otimização do processo de exploração de impacto reduzido, uma vez que atividades relacionadas à colheita são responsáveis por 30% dos impactos negativos causados às árvores remanescentes da floresta. O estudo foi realizado em uma floresta ombrófila densa da região de Porto Acre, na região norte do Acre. O modelo proposto foi construído tendo como base o modelo clássico de

localização de p-medianas, e sua função objetivo buscava minimizar a movimentação dos *skidders* no processo de transportar as árvores para os pátios de madeira. A formulação do modelo incluía também um conjunto de restrições de adjacência que impedia que *grids* vizinhos fossem colhidos em um mesmo período impedindo a criação de grandes áreas abertas.

Uma particularidade deste modelo é que o limite de colheita imposto é de cinco árvores por hectare por *grid*, uma vez que se trata da colheita de árvores tropicais nativas da região amazônica. Foram criados 32 cenários, 16 cenários para floresta balanceada e 16 para florestas desbalanceadas, solucionados utilizando o algoritmo *branch and bound* no *software* Lingo 14.0. A inclusão de restrições de número de árvores máxima permitida para colheita gerou um impacto na vegetação remanescente menor do que o plano de manejo atualmente executado na área e a restrição de adjacência teve impacto negativo nos lucros do planejamento (SILVA et al., 2018).

Avaliar os efeitos do número de soluções independentes no desempenho de processos de busca em vizinhança foi o objetivo do artigo de Dong et al. (2018). Os autores utilizaram o algoritmo AS como abordagem base e testaram três técnicas de busca em vizinhança diferentes. O Método 1, utilizou o método de busca 1-opt. O Método 2 oscila entre o movimento 1-opt e o 2-opt permutado, ou trocado, em que ao invés de se inserir dois novos talhões à nova solução, inverte-se de posição talhões já presentes na solução corrente. Já o Método 3 utiliza apenas a versão permutada do algoritmo 2-opt.

Cinco florestas hipotéticas foram criadas para o estudo, com 400, 1.600, 3.600, 6.400 e 10.000 talhões, cada talhão contendo 10 ha e idades geradas aleatoriamente variando entre zero e 50 anos. As opções de manejo permitidas foram o corte raso, uma vez que as árvores do talhão tenham no mínimo 30 anos, ou a opção de não realizar a colheita do talhão. O objetivo do modelo avaliado foi maximizar o volume de madeira colhido durante o horizonte de planejamento definido de 50 anos, dividido em períodos em 10 períodos de cinco anos (DONG et al., 2018).

Três problemas foram criados para avaliar os impactos do número de soluções independentes gerados. O primeiro não inclui nenhum tipo de restrição de adjacência, porém, possui em sua formulação restrições de equilíbrio de fluxo e de estoque final. O segundo, além das restrições incluídas na primeira

formulação considera também a restrição URM. O último modelo ao invés de utilizar a restrição URM faz uso da ARM. As restrições de adjacência incluem a limitação de tempo de *green-up* de dois períodos. Dong et al., (2018b) também observaram que não houve método considerado melhor para todas as abordagens. O número ótimo de soluções independentes necessárias para a resolução do problema incluindo a restrição ARM segue uma função logarítmica negativa relacionada ao tamanho do problema, porém, o número de soluções não foi sensível ao tamanho do problema tanto para a formulação sem restrições espaciais quanto para a URM. O tipo de adjacência apesar de possuir efeito moderado no número de soluções independentes geradas não chegou a ser estatisticamente significativo.



### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta revisão conceitos de restrições de adjacência, como sua origem na teoria dos grafos e a diferenciação dos modelos de restrição de área e modelos de restrição de unidade foram apresentados. Partindo da definição de conceitos aplicações no planejamento florestal foram apresentadas e a partir destas pode-se observar que a restrição do tipo ARM foi a mais utilizada pelos pesquisadores nos artigos. A preferência por modelos de restrição de área frente aos modelos de restrição de unidade está na flexibilidade alcançada com este tipo de abordagem, que torna possível a colheita de talhões vizinhos, uma vez que a área combinada destes não ultrapasse o limite imposto pelo modelo.

Para lidar com a natureza complexa do problema de colheita florestal considerando restrições de adjacência, muitos artigos utilizaram métodos heurísticos como método de resolução. Problemas do tipo NP-Hard, como o tratado por esta revisão, têm seus tempos de solução crescendo exponencialmente em função do número de restrições e variáveis do problema. Isto tende a tornar o tempo de resolução por métodos exatos muito longos, justificando a escolha por heurísticas para encontrar boas soluções com menor tempo de processamento. Entre os algoritmos utilizados destaca-se a relevância da metheurística *Simulated Annealing*.

Observou-se o aumento do interesse no desenvolvimento de modelos multiobjetivos que incluíssem entre suas restrições relações de adjacência. Autores passaram a avaliar questões econômicas/financeiras da produção de madeira na função objetivo e incluir demandas relacionadas, por exemplo, ao mercado de carbono. Notou-se também a escassez de trabalhos que integrassem ao processo de otimização do planejamento colheita florestal com restrições de adjacência questões relacionadas à otimização do transporte florestal.



## REFERÊNCIAS

AKBULUT, R. et al. Spatial forest plan development using heuristic processes seeded with a relaxed linear programming solution. **Forest Science**, v. 63, n. 5, p. 518-528, 2017. <http://dx.doi.org/10.5849/fs-2017-040>.

AUGUSTYNICZIK, A.L.D.; ARCE, J.E.; SILVA, A.C.L. da. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 649-656, 2015. doi: <https://doi.org/10.1590/01047760201521042006>

BACHMATIUK, J.; GARCIA-GONZALO, J.; BORGES, J. G. Analysis of the performance of different implementations of a heuristic method to optimize forest harvest scheduling. **Silva Fennica**, 2015. Disponível em: <<https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/13803>> doi: 10.14214/sf.1326

BETTINGER, P.; DEMIRCI, M.; BOSTON, K. Search reversion within s-metaheuristics: impacts illustrated with a forest planning problem. **Silva Fennica**, v. 49, n. 2, 2015. doi: <https://doi.org/10.14214/sf.1232>

BINOTI, D. H. B. et al. Regulation of even-aged forest with adjacency constraints. **Forest Policy and Economics**, v. 20, p. 49-57, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.02.009>

BINOTI, D. H. B. et al. Regulação de florestas equiâneas com restrição de classes de idade por compartimento. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 567-573, 2014a. doi: <https://doi.org/10.1590/01047760201420041183>

BINOTI, D. H. B et al. Regulation of even-aged forests with inclusion of environmental constraints. **Cerne**, v. 20, n. 1, p. 29-36, 2014b. doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602014000100004>.

BORGES, P. et al. Impact of maximum opening area constraints on profitability and biomass availability in forestry-a large, real world case. **Silva Fennica**, v. 49, n. 5, p. 1-21, 2015 doi: <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1347>

BORGES, P. et al. Effects of site productivity on forest harvest scheduling subject to green-up and maximum area restrictions. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 5, p. 507-516, 2016. doi: <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1089931>

BORGES, P.; EID, T.; BERGSENG, E. Applying simulated annealing using different methods for the neighborhood search in forest planning problems. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 3, p. 700-710, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.039>

BOSTON, K.; BETTINGER, P. The economic impact of green-up constraints in the southeastern United States. **Forest Ecology and Management**, v. 145, n. 3, p. 191-202, 2001. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00417-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00417-5)

CAGLAYAN, İ. et al. Spatial harvest scheduling for oak coppices conversion into high forest involving wood production management. **BOSQUE**, v. 39, n. 2, p. 177-190, 2018. doi: <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200177>

CARVAJAL, R. et al. Imposing connectivity constraints in forest planning models. **Operations Research**, v. 61, n. 4, p. 824-836, 2013. doi: <https://doi.org/10.1287/opre.2013.1183>

CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; BORGES, J. G. A new mixed-integer programming model for harvest scheduling subject to maximum area restrictions. **Operations Research**, v. 56, n. 3, p. 542-551, 2008. doi: <https://doi.org/10.1287/opre.1070.0472>

CYR, G. et al. Using operating area size and adjacency constraints to mitigate the effects of harvesting activities on boreal caribou habitat. **Landscape**

**Ecology**, v. 32, n. 2, p. 377-395, 2017. doi: <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0455-x>

DONG, L. et al. Spatial forest harvest scheduling for areas involving carbon and timber management goals. **Forests**, v. 6, n. 4, p. 1362-1379, 2015a. doi: <https://doi.org/10.3390/f6041362>

DONG, L. et al. A comparison of a neighborhood search technique for forest spatial harvest scheduling problems: A case study of the simulated annealing algorithm. **Forest Ecology and Management**, v. 356, p. 124-135, 2015b. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.07.026>

DONG, L. et al. Evaluating the neighborhood, hybrid and reversion search techniques of a simulated annealing algorithm in solving forest spatial harvest scheduling problems. **Silva Fennica**, v. 50, n. 4, p. 1-20, 2016.

DONG, L. et al. Reflections on the number of independent solutions for forest spatial harvest scheduling problems: a case of simulated annealing. **Silva Fennica**, v. 52, n. 1, p. 7803, 2018. doi: <https://doi.org/10.14214/sf.7803>

DONG, L.; LU, W.; LIU, Z. Developing alternative forest spatial management plans when carbon and timber values are considered: A real case from northeastern China. **Ecological Modelling**, v. 385, p. 45-57, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.07.009>

GÓMEZ, T. et al. A multiobjective model for forest planning with adjacency constraints. **Annals of Operations Research**, v. 190, n. 1, p. 75-92, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0525-4>

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. L. EFEITO DAS RESTRIÇÕES ESPACIAIS DE ADJACÊNCIA NO PLANEJAMENTO FLORESTAL OTIMIZADO. **Floresta**, v. 40, n. 3, p. 573-584, 1 out. 2010. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v40i3>.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, Arinei C. L. Comparação entre a meta-heurística *simulated annealing* e a programação linear inteira no agendamento da colheita florestal com restrições de adjacência. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 449-460, abri-jun 2013.

GOYCOOLEA, M. et al. Evaluating approaches for solving the area restriction model in harvest scheduling. **Forest Science**, v. 55, n. 2, p. 149-165, 2009. doi: <https://doi.org/10.1093/forestscience/55.2.149>

HERNANDEZ, M. et al. Efficiency in forest management: A multiobjective harvest scheduling model. **Journal of forest economics**, 20(3), 236-251, 2014. doi: 10.1016/j.jfe.2014.06.002

JOHN, R. S.; TÓTH, S. F. Spatially explicit forest harvest scheduling with difference equations. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 235-257, 2015. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-012-1301-4>

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives—discussion and synthesis. **Forest Science**, v. 23, n. suppl\_1, p. a0001-z0001, 1977.

KADIOĞULLARI, A.İ. et al. Controlling spatial forest structure with spatial simulation in forest management planning: a case study from Turkey. **Sains Malaysiana**, v. 44(n. 3), pp. p. 325-336, 2015. doi: 10.17576/jsm-2015-4403-03

KAŠPAR, J., MARUŠÁK, R.; HLAVATÝ, R. A forest planning approach with respect to the creation of overmature reserved areas in managed forests. **Forests**, v. 6, n. 2, p. 328-343, 2015. doi: <https://doi.org/10.3390/f6020328>

KAŠPAR, J.; MARUŠÁK, R.; BETTINGER, P. Time efficiency of selected types of adjacency constraints in solving unit restriction models. **Forests**, v. 7, n. 5, p. 102, 2016. doi: <https://doi.org/10.3390/f7050102>

KÖNNYŰ, N.; TÓTH, S. F. A cutting plane method for solving harvest scheduling models with area restrictions. **European Journal of Operational Research**, 228(1), 236-248, 2013. doi: 10.1016/j.ejor.2013.01.020

LIMA, A.B.N.P.M. **Plano ótimo econômico de manejo de corte para florestas de eucaliptos**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Agronomia). Universidade de São Paulo, 1988.

LIU, W.-Y.; LIN, C.-C. Spatial forest resource planning using a cultural algorithm with problem-specific information. **Environmental Modelling & Software**, v. 71, p. 126-137, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.06.002>

LIU, W.-Y.; LIN, C.-C.; SU, K.-H. Modelling the spatial forest-thinning planning problem considering carbon sequestration and emissions. **Forest Policy and Economics**, v. 78, p. 51-66, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.01.002>

MARTINS, I. et al. Modeling target volume flows in forest harvest scheduling subject to maximum area restrictions. **Top**, v. 22, n. 1, p. 343-362, 2014. doi: <https://doi.org/10.1007/s11750-012-0260-x>

MARUŠÁK, R.; KAŠPAR, J.; VOPĚNKA, P. Decision Support Systems (DSS) optimal—A case study from the Czech Republic. **Forests**, v. 6, n. 1, p. 163-182, 2015. doi: <https://doi.org/10.3390/f6010163>

MCDILL, M. E. et al. Comparing Model I and Model II Formulations of Spatially Explicit Harvest Scheduling Models with Maximum Area Restrictions. **Forest Science**, v. 62, n. 1, 2016.

MCDILL, M. E.; REBAIN, S. A.; BRAZE, J. Harvest scheduling with area-based adjacency constraints. **Forest Science**, v. 48, n. 4, p. 631-642, 2002. doi: <https://doi.org/10.1093/forestscience/48.4.631>

NETO, T. et al. Forest harvest scheduling with clearcut and core area constraints. **Annals of Operations Research**, v. 258, n. 2, p. 453-478, 2017. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2313-2>

QIN, H.; DONG, L.; HUANG, Y. Evaluating the effects of carbon prices on trade-offs between carbon and timber management objectives in forest spatial harvest scheduling problems: a case study from northeast China. **Forests**, v. 8, n. 2, p. 43, 2017. doi: <https://doi.org/10.3390/f8020043>

REBENNACK, S. Stable Set Problem: Branch & Cut Algorithms. *In*: FLOUDAS C.A.; PARDALOS P.M. (Eds.). **Encyclopedia of Optimization**. Springer, p. 3676–3688, 2008.

RODRIGUES, F.L. et al. Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento. **Revista Árvore**, v. 30, n. 5, p. 769-778, 2006. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000500010>

RÖNNQVIST, M. et al. Operations research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 11-40, 2015. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1907-4>

SHAN, Y. et al. Pitfalls and potential of particle swarm optimization for contemporary spatial forest planning. **Forest systems**, v. 21, n. 3, p. 468-480, 2012. doi: [10.5424/fs/2012213-03692](https://doi.org/10.5424/fs/2012213-03692)

SILVA, P.H. et al. Optimal selective logging regime and log landing location models: a case study in the Amazon forest. **Acta Amazonica**, v. 48, n. 1, p. 18-27, 2018. doi: <https://doi.org/10.1590/1809-4392201603113>

STRIMBU, B. M.; INNES, J. L.; STRIMBU, V. F. A deterministic harvest scheduler using perfect bin-packing theorem. **European Journal of Forest Research**, v. 129, n. 5, p. 961-974, 2010. doi: <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0405-0>

THOMPSON, E.F.; HALTERMAN, B.G.; LYON, T.J.; MILLER, R.L. Integrating timber and wildlife management planning. **The Forestry Chronicle**, v. 49, n. 6, p. 247-250, 1973

TÓTH, S. F.; MCDILL, M. E. Promoting large, compact mature forest patches in harvest scheduling models. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 13, n. 1, p. 1-15, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10666-006-9080-4>

TÓTH, S. F. et al. Testing the use of lazy constraints in solving area-based adjacency formulations of harvest scheduling models. **Forest Science**, v. 59, n. 2, p. 157-176, 2013a. doi: <https://doi.org/10.5849/forsci.11-040>

TÓTH, S. F. et al. ECOSEL: Multi-objective optimization to sell forest ecosystem services. **Forest Policy and Economics**, v. 35, p. 73-82, 2013b. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.06.011>

TRONCOSO, J.J.; WEINTRAUB, A.; MARTELL, D.L. Development of a threat index to manage timber production on flammable forest landscapes subject to spatial harvest constraints. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 54, n. 3, p. 262-281, 2016. doi: <https://doi.org/10.1080/03155986.2016.1197543>

UNIVERSITY OF WASHINGTON. **ECOSEL: About ECOSEL**. Seattle, 2019. Disponível em: <https://ecosel.cfr.washington.edu/about/default.aspx>. Acesso em: 16 set. 2019.

WEI, R.; MURRAY, A.T. Spatial uncertainty in harvest scheduling. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 275-289, 2015. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-012-1178-2>

WEINTRAUB, A. Integer programming in forestry. **Annals of Operations Research**, v. 149, n. 1, p. 209-216, 2007. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-006-0105-9>

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P. A new optimization model for spatially constrained harvest scheduling under area restrictions through maximum flow problem. **Forest Science**, v. 64, n. 4, p. 392-406, 2018. doi: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxy006>

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P.; KONOSHIMA, M. Optimal forest stand aggregation and harvest scheduling using compactly formulated integer programming. **FORMATH**, v. 16, p. 22-31, 2017. doi: <https://doi.org/10.15684/formath.16.003>

YOSHIMOTO, A.; KONOSHIMA, M. Spatially constrained harvest scheduling for multiple harvests by exact formulation with common matrix algebra. **Journal of forest research**, v. 21, n. 1, p. 15-22, 2016. doi: <https://doi.org/10.1007/s10310-015-0507-0>

ZENGIN, H. et al. Modeling harvest scheduling in multifunctional planning of forests for longterm water yield optimization. **Natural Resource Modeling**, v. 28, n. 1, p. 59-85, 2015. doi: <https://doi.org/10.1111/nrm.12057>

ZHU, J.; BETTINGER, P. Estimating the effects of adjacency and green-up constraints on landowners of different sizes and spatial arrangements located in the southeastern US. **Forest Policy and Economics**, v. 10, n. 5, p. 295-302, 2008.



#### 4 OTIMIZAÇÃO INTEGRADA DA COLHEITA E DO TRANSPORTE FLORESTAL UTILIZANDO RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIA ESPACIAL

##### RESUMO

Esta pesquisa tem por objetivo propor um modelo matemático de otimização do planejamento florestal incluindo decisões relacionadas à colheita e ao transporte com restrições de adjacência. Faz-se a otimização integrada do ambiente tático e estratégico de planejamento ao se incluir períodos de diferentes dimensões em um mesmo horizonte de planejamento. A fim de avaliar o comportamento do modelo 21 cenários foram propostos. Os resultados obtidos demonstraram que ao se comparar o cenário livre e sem adjacência aos demais cenários, todos apresentam redução no valor presente líquido. Porém ao se comparar modelos de mesma característica, os cenários incluindo restrições de adjacência apresentaram pouca variação ao serem confrontados com o cenário sem adjacência de seu subgrupo, indicando baixos impactos causados pela inclusão da restrição de adjacência ao modelo.

**Palavras-chave:** Modelo de restrição de área, Pesquisa Operacional, Programação linear inteira mista

##### ABSTRACT

We aim to propose a mathematical model to optimize forest planning including decisions related to harvesting and transportation with adjacency restrictions. The model integrates tactical and strategic planning by including periods of different dimensions in the same planning horizon. In order to assess the model performance, 21 scenarios were proposed. The obtained results showed that when comparing the scenario without adjacency and free to the other scenarios, all of them presented a reduction in the net present value. However, when comparing models of the same characteristic, the scenarios including adjacency restrictions showed little variation when confronted with the scenario with no adjacency of its subgroup, indicating low impacts caused by the inclusion of the adjacent restriction to the model.

**Keywords:** Area restriction model, Operations research, Mixed integer linear programming

## 4.1 INTRODUÇÃO

Distribuir os recursos disponíveis dentro das restrições existentes, de maneira que as necessidades dos gestores das empresas florestais e seus clientes sejam satisfeitas faz parte da finalidade do planejamento florestal (SPIECKER, 1975). Segundo Rönnqvist (2003) e D'Amours Rönnqvist e Weintraub (2008), pode-se dividir o planejamento da cadeia de suprimentos florestal em três níveis: estratégico (longo prazo), tático (médio prazo) e operacional (curto prazo). Todos os níveis de planejamento devem estar bem alinhados, pois decisões estratégicas implicam em limitações impostas as decisões táticas, que por sua vez limitam as operacionais (D'AMOURS; RÖNNQVIST; WEINTRAUB, 2008). Isto faz com que as informações oriundas de níveis superiores de planejamento tornem-se entradas para as etapas seguintes. Devido a complexidade da cadeia de suprimentos florestal, classificada como divergente, ou seja, o número de produtos multiplica-se ao longo da cadeia de produção (RÖNNQVIST, 2003; D'AMOURS; RÖNNQVIST; WEINTRAUB, 2007; VAHID et al, 2016), seu planejamento é usualmente feito de forma hierárquica, isto é, faz o planejamento estratégico, em seguida o tático e assim por diante (ACUNA, 2017). Porém uma estratégia hierárquica pode levar a soluções que não maximizem de forma global o retorno aos gestores florestais (TRONCOSO et al, 2015).

Além de questões logísticas de planejamento, preocupações espaciais relacionadas ao padrão resultante das atividades de colheita florestal têm tido destaque. A fim de se incluir esta característica em modelos matemáticos de planejamento florestal faz-se o uso de restrições de adjacência. Estas restrições têm origem na teoria dos grafos (TÓTH et al., 2013a) e seu uso no meio florestal tem seu primeiro registro no trabalho publicado por Thompson et al. no ano de 1973, em que pares vizinhos de talhões não podiam ser colhidos em um mesmo período. A esta abordagem deu-se o nome de modelo de restrição de unidade (URM), e a partir de sua flexibilização originou-se uma segunda abordagem, a ARM (*area restriction model*). Esta segunda abordagem permitiu que talhões vizinhos fossem colhidos em um mesmo período contanto que a soma de suas áreas não excedesse o limite máximo imposto pelo modelo (BORGES;

BERGSENG; EID, 2014). Esta flexibilização aumentou a dificuldade de resolução dos problemas uma vez que um conjunto de talhões poderiam ser combinados de diversas formas gerando *clusters* que atendessem a restrição de área imposta (YOSHIMOTO; ASANTE, 2018). Graças a esta natureza combinatorial problemas envolvendo restrições de área são em grande parte solucionados utilizando como estratégia abordagens heurísticas, no entanto, três métodos exatos de solução são amplamente estudados: *path*, *cluster* e *bucket*.

A formulação *path* proposta por McDill, Rebain e Braze (2002), enumera de forma recursiva todos os conjuntos de talhões que excedem a área máxima definida pelo problema, criando restrições para cada uma das infactibilidades identificadas. A abordagem *cluster*, proposta também por McDill, Rebain e Braze (2002), utiliza uma variável para cada bloco formado (*cluster*), cuja área total somada não exceda o valor estabelecido pelo problema. Já a formulação *bucket* baseia-se na definição de grupos, ou buckets, a-priori, em que cada talhão é alocado em apenas um *bucket*. Talhões designados para um mesmo *bucket* devem ser vizinhos, caso contrário divide-se o agrupamento de forma que ele contenha apenas talhões vizinhos. A soma de suas áreas não deve ultrapassar o limite determinado no modelo e *buckets* agendados para a colheita em um mesmo período não poderão ser adjacentes (GOYCOOLEA et al., 2009).

O presente estudo tem por objetivo propor um novo modelo matemático de otimização para o planejamento florestal incluindo decisões relacionadas à colheita e ao transporte e restrições de adjacência. A motivação desta pesquisa foi estudar a viabilidade operacional a nível de modelagem, de se inserir períodos de diferentes dimensões em um mesmo modelo, e decisões de abastecimento da cadeia de suprimentos florestal, permitindo desta forma, aos gestores florestais a possibilidade de se avaliar cenários táticos e estratégicos da indústria em um mesmo modelo sem negligenciar questões de cunho ambiental. O documento contém a seguir os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, seguido pelos resultados obtidos e por fim sua conclusão e recomendações para trabalhos futuros.

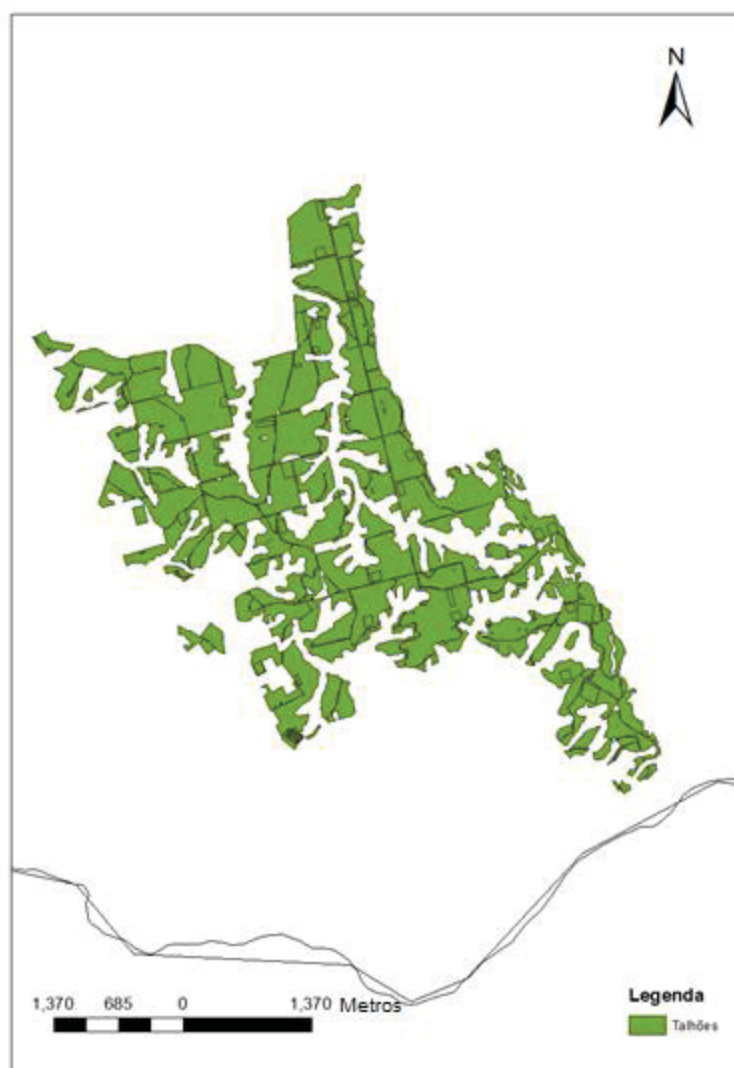
## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.2.1 Área de estudo e descrição do problema

O estudo foi desenvolvido em uma área pertencente à uma empresa produtora de painéis de madeira, localizada no município de Campo do Tenente, Paraná. O clima, segundo Köppen, é classificado como Cfb: temperado com verões amenos, chuvas igualmente distribuídas e ocorrências de geadas severas (LOPES et al., 2015).

A área designada para a pesquisa compreende 1046,23 ha, distribuídos em reflorestamentos de *Pinus taeda*. A Figura 4-1 apresenta o recorte da área de estudos com os talhões em destaque.

FIGURA 4-1 - MAPA DA ÁREA DE ESTUDO COM TALHÕES EM DESTAQUE



FONTE: A AUTORA (2020).

A floresta avaliada neste estudo foi subdividida em 237 talhões que apresentam idades iniciais de 1 a 18 anos. Da área disponível, 70% possui índice de sítio de 28,8 m e mais de 95% dos talhões possuem densidade de plantio de 1.600 árvores/ha. As projeções de crescimento volumétrico de madeira na floresta foram definidas de acordo com dados fornecidos pela empresa.

Neste trabalho, buscou-se realizar o planejamento integrado de médio e longo prazo do planejamento da colheita florestal, fazendo uso de restrições espaciais de adjacência, para abastecimento da produção de uma empresa florestal.

O modelo aqui proposto baseou-se na abordagem apresentada por Troncoso et al. (2015) para tratar dos diferentes horizontes de planejamento, em que um modelo de programação inteira mista para avaliar estratégias de integração na cadeia de valor florestal foi aplicado em uma indústria chilena. Para a implementação da restrição ARM em modelos de programação inteira mista baseou-se na abordagem de McDill, Rebain e Braze (2002).

Desta forma, buscou-se maximizar o valor presente líquido (VPL) obtido durante a colheita florestal, considerando o fluxo de caixa obtido entre as receitas arrecadadas com a colheita da área e os custos operacionais referentes ao processo de colheita e transporte, bem como uma possível compra de madeira para abastecimento da indústria.

Para a construção do modelo de otimização foi considerado um horizonte de planejamento de 15 anos, divididos em 7 períodos. Os primeiros cinco períodos possuem duração de um ano cada, enquanto os dois últimos períodos correspondem a 5 anos cada. Assim nos primeiros cinco períodos foi realizado o planejamento tático de agendamento, enquanto os dois últimos períodos estão no campo estratégico. Apenas uma rotação foi considerada, em regimes de manejo sem desbaste e com corte raso dos talhões com idade entre 12 e 19 anos.

Assume-se que durante o período tático a floresta deva abastecer a unidade produtora com 35.000 m<sup>3</sup> de madeira de processo por ano, além de respeitar contratos firmados de abastecimento de clientes da região, fornecendo um volume anual total de aproximadamente 57.000 m<sup>3</sup> de madeira. Dois diferentes sortimentos são fornecidos a estes clientes, toras de 2,65 m com diâmetro variando entre 18 cm e 23 cm (S1) e toras entre 23 cm e 30 cm (S2), também de 2,65 m. Previsões de demanda muito longas estão sujeitas a erros maiores, desta forma, os abastecimentos tanto da unidade fabril quanto dos clientes externos são otimizados apenas para os períodos táticos.

Caso a madeira de processo obtida durante o período não seja suficiente para suprir as necessidades da fábrica, o modelo pode decidir por comprar madeira de processo de fornecedores externos. Apenas dados relacionados ao custo de compra de material foram fornecidos pela empresa. Para que fosse

possível simular uma maior dinâmica de mercado 30 fornecedores foram gerados, de forma aleatória, com o auxílio da ferramenta de geração de pontos do ArcGIS® - ArcMap™ 10.4.1 (ESRI, 2016), e a distância Euclidiana calculada entre o fornecedor e unidade fabril.

Informações referentes a custo e capacidade de colheita, custo de transporte e valores de mercado foram fornecidas pela empresa, bem como a taxa de juros de 7,5% ao ano.

#### 4.2.2 Restrições de adjacência

De acordo com Augustynczik (2014), existem diversas formas de se estabelecer a adjacência entre dois talhões, sendo a mais frequente delas a definição de que estes são adjacentes caso compartilhem uma linha em comum. É possível usar como parâmetro de vizinhança a existência de pelo menos um ponto em comum entre os polígonos. Além disso, é possível utilizar como regra para a definição de adjacência caso qualquer ponto de um talhão esteja a uma distância mínima de seu par.

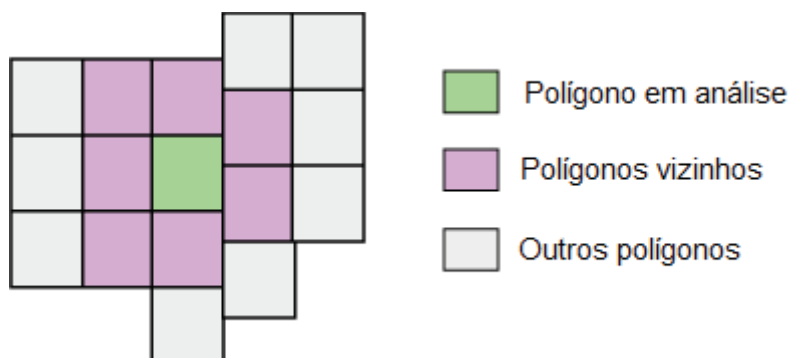
Para a definição da lista de adjacências neste trabalho, o software ArcGIS® - ArcMap™ 10.4.1 (ESRI, 2016) foi utilizado. Nele a ferramenta “*Polygon Neighbors*”, de análise de proximidade foi utilizada. Esta ferramenta realiza a determinação de polígonos através de uma sequência simples de passos:

- i. Selecione um polígono presente na malha em análise;
- ii. Encontre todos os polígonos que fazem intersecção ao polígono corrente.
- iii. Inclua na lista mestre de vizinhos.

O *software* ArcGIS considera uma intersecção entre polígonos formas que compartilhem nós e/ou arestas. Desta forma, neste estudo utilizam-se duas abordagens para a determinação da lista de adjacências. Talhões sem nenhuma vizinhança encontrados durante a análise foram considerados adjacentes ao talhão mais próximo a ele, a fim de se conectar todas as áreas. Na Figura 4-2,

representa-se o resultado obtido pelo processo executado pela ferramenta, em que a área em verde corresponde ao talhão em análise e os polígonos em roxo representam vizinhos identificados durante a exploração da vizinhança.

Figura 4-2 - ADJACÊNCIAS ENTRE POLÍGONOS

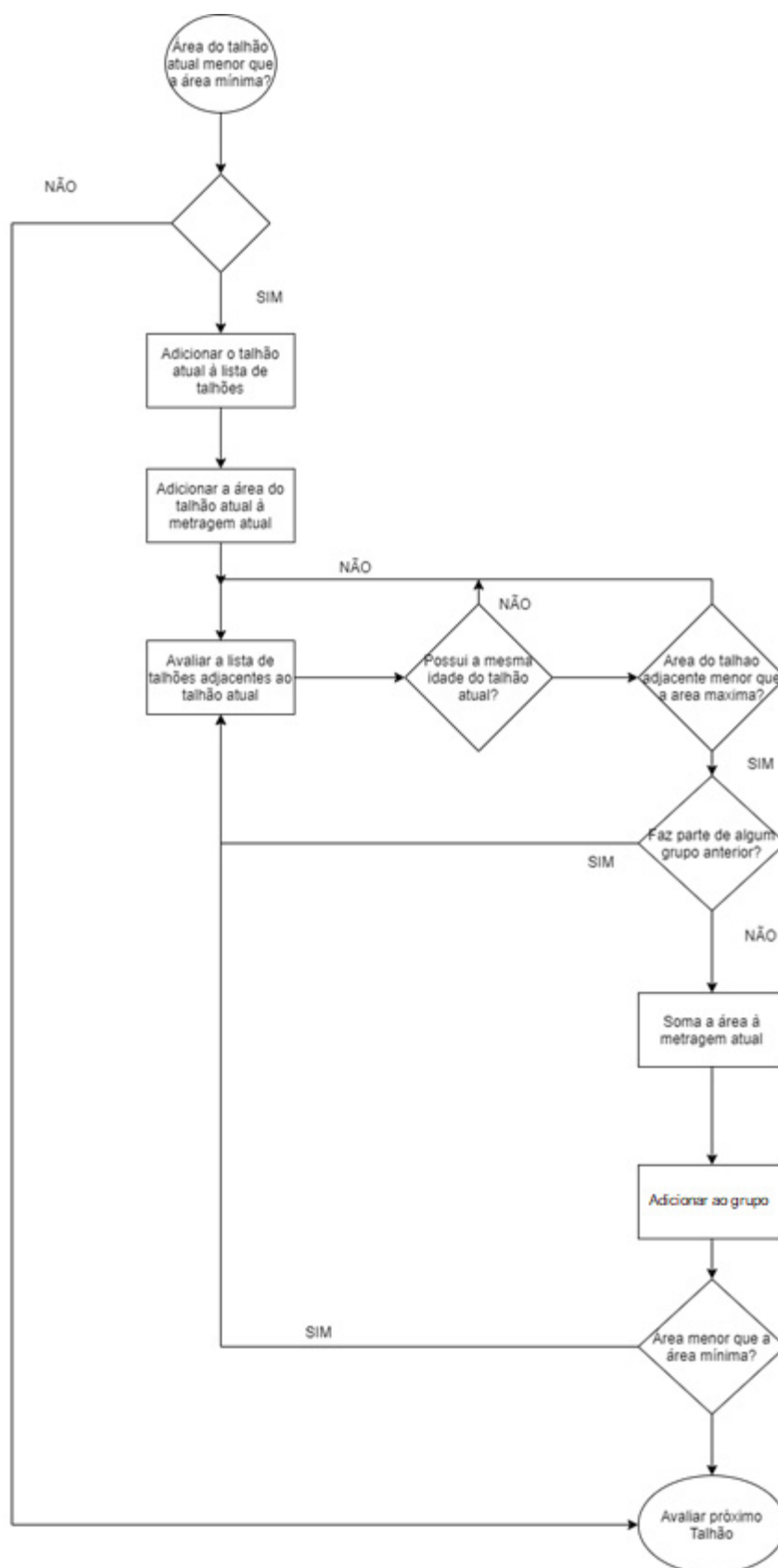


FONTE: ADAPTADO DE ESRI (2020).

Oteve-se como resultado uma lista de adjacência para os 237 talhões, cada um contendo uma média de 4,5 vizinhos. A fim de se minimizar o número de possíveis combinações e com isso, reduzir a complexidade e o tempo de processamento do problema, fez-se a união de talhões vizinhos com área inferior à 5 ha com a mesma idade. Para este processo os passos descritos pela Figura 4-3 foram seguidos.



FIGURA 4-3 – DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE EXECUÇÃO DE UNIÃO DE TALHÕES ADJACENTES.



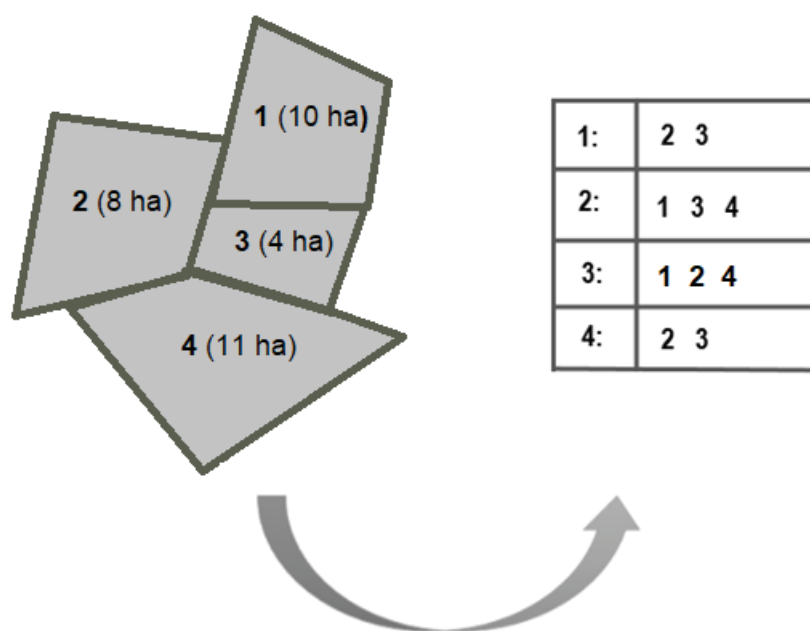
FONTE: A AUTORA (2020).

O processo tem início com a avaliação da área do talhão em análise, caso ele tenha área inferior a 5 hectares é adicionado à lista atual de talhões e sua área adicionada à metragem atual. Com o processamento do primeiro talhão analisa-se sua lista de vizinhos. Caso esta lista possua talhões adjacentes de mesma idade que o talhão corrente, faz-se a sequência de investigação deste talhão, observando se ele atende aos requisitos da área e incorporando-o à lista de talhões, até que novos conjuntos não sejam criados.

A determinação dos novos talhões foi realizada através da implementação do algoritmo supracitado na linguagem de programação C++. Uma vez feita união de unidades vizinhas estas passavam a ser tratadas como talhões individuais e, mais uma vez, o processamento de seus vizinhos foi realizado. Estes passos foram realizados à exaustão até que novos grupos não fossem criados, gerando ao final um conjunto de 183 talhões com média de 4,15 vizinhos.

A restrição ARM foi obtida através da lista de adjacência gerada no processo acima descrito. Uma lista de adjacência (FIGURA 4-4) é uma estrutura que representa as relações de vizinhança entre os talhões, em que cada linha da lista contém os polígonos (talhões) vizinhos ao talhão simbolizado pelo índice da linha.

FIGURA 4-4 – EXEMPLO DE UMA LISTA DE ADJACÊNCIAS.



FONTE: A AUTORA (2020).

A geração do conjunto de restrições ARM foi realizada através de uma rotina implementada em C++ baseada no *Path Algorithm* proposto em 2002 por McDill, Rebain e Braze. Neste estudo a forma modificada do algoritmo *Path*, descrita a seguir, foi utilizada de forma a reduzir o universo de buscas na geração de restrições.

- i. Para um determinado período inicie com um par de talhões adjacentes quaisquer, cuja idade esteja dentro do intervalo permitido para a colheita. Caso o somatório da área deste par de polígonos exceda a área máxima estabelecida escreva a restrição para este par, caso contrário continue o algoritmo;
- ii. Selecione qualquer talhão adjacente ao grupo previamente formado, cuja idade também esteja dentro do intervalo de idades permitidos para o período. Calcule a área acumulada;
- iii. Defina uma rede, baseada no grupo atual, em que os nós da rede correspondem aos talhões e os arcos correspondem às suas ligações. Cada vez que uma área excedente for encontrada ou quando não existirem mais talhões adjacentes uma restrição é criada. Verifique se há a formação de subciclos, ou seja, se um

talhão foi inserido de forma redundante no conjunto em análise. Casos assim são possíveis quando se analisa talhões adjacentes à um talhão em comum. Ademais, verifique se houve a formação de restrições repetidas e elimine as duplicações;

- iv. Caso todos os grupos tenham sido identificados e convertidos em restrições ARM, pare. Caso contrário, retorne ao passo 2.

#### 4.2.3 Formulação matemática

A seguir são apresentados os conjuntos utilizados para a definição do problema, bem como os parâmetros utilizados pelo modelo, as variáveis de decisão e por fim o modelo matemático.

Conjuntos:

$I$	Conjunto de talhões.
$I_t^1$	Conjunto de talhões que não podem ser colhidos no período $t$ .
$J$	Conjunto de clientes.
$F$	Conjunto de fornecedores.
$L$	Conjunto de sortimentos.
$T$	Conjunto de períodos ( $T_T \cup T_E$ ).
$T_T$	Conjunto de períodos do horizonte de planejamento tático ( $T_T = \{t_1^T, t_2^T, \dots, t_{n_T}^T\}$ ).
$T_E$	Conjunto de períodos do horizonte de planejamento estratégico ( $T_E = \{t_1^E, t_2^E, \dots, t_{n_E}^E\}$ ).

Parâmetros:

$v_{it}^1$	Valor presente líquido (R\$) do talhão $i$ caso ele tenha sido colhido no período $t$ .
$c_{it}$	Custo unitário (R\$/m <sup>3</sup> ) de transporte da madeira do talhão $i$ para a fábrica no período $t$ .

- $w_{ijt}$  Custo unitário (R\$/m<sup>3</sup>) de transporte da madeira do talhão  $i$  para o cliente  $j$  no período  $t$ .
- $h_{it}$  Custo de colheita da madeira (R\$/m<sup>3</sup>) no talhão  $i$  no período  $t$ .
- $b_{ft}$  Custo para comprar madeira de processo do fornecedor  $f$  para a fábrica no período  $t$  (R\$/m<sup>3</sup>).
- $s_{it}$  Volume total de madeira (m<sup>3</sup>) no talhão  $i$  no período  $t$ .
- $s_{ilt}^0$  Volume disponível de madeira (m<sup>3</sup>) no talhão  $i$  do sortimento  $l$  no período  $t$ .
- $a_t^-$  Redução máxima permitida (%) no rendimento da colheita do período  $t$  para o próximo período.
- $a_t^+$  Incremento máximo permitido (%) no rendimento da colheita no período  $t$  para o próximo período.
- $\gamma_j$  Limite contratual de abastecimento (%) firmado entre o cliente  $j$  e a fábrica.
- $n_i$  Coeficiente que indica o número de talhões adjacentes ao talhão  $i$ .
- $g_t$  Capacidade de colheita (m<sup>3</sup>) no período  $t$ .
- $D_{lt}$  Demanda da fábrica (m<sup>3</sup>) por madeira do sortimento  $l$  no período  $t$ .
- $d_{jlt}$  Demanda do cliente (m<sup>3</sup>)  $j$  pelo sortimento  $l$  no período  $t$ .
- $M_{ft}$  Capacidade de abastecimento (m<sup>3</sup>) do fornecedor  $f$  no período  $t$ .
- $\lambda(i)$  Cluster de talhões  $i$ , em idade de corte no período  $t$ , com área superior à área limite.
- $r(i)$  Número de talhões em  $\lambda(i)$ .
- $l_t$  Número de anos em um período  $t$  de planejamento.

Variáveis:

- $x_{it} \begin{cases} 1, \text{ se o bloco } i \text{ é colhido no período } t \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
- $y \begin{cases} 1, \text{ se } l_E \text{ for menor que o somatório de anos do horizonte tático} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
- $z \begin{cases} 1, \text{ se } l_E \text{ for maior ou igual ao somatório de anos do horizonte tático} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
- $q_{lijt}^2$  Volume de madeira (m<sup>3</sup>) do sortimento  $l$  do talhão  $i$  vendido para o consumidor  $j$  no período  $t$ .
- $q_{ilt}^1$  Volume transportado de madeira (m<sup>3</sup>) do sortimento  $l$  entre o talhão  $i$  para a fábrica no período  $t$ .

- $q_{ft}$  Volume de madeira de processo (m<sup>3</sup>) comprada do fornecedor  $f$  no período  $t$  para suprir a demanda da fábrica
- $k_{ilt}$  Volume não transportado (m<sup>3</sup>) com origem no talhão  $i$  do sortimento  $l$  para a unidade fabril no período  $t$ .

$$\begin{aligned} \max Z = & \sum_i \sum_t v_{it}^1 x_{it} - \sum_i \sum_t h_{it} x_{it} - \sum_i \sum_l \sum_{t \in T_T} c_{it} q_{ilt}^1 \\ & - \sum_i \sum_j \sum_l \sum_{t \in T_T} w_{ijt} q_{lijt}^2 - \sum_f \sum_{t \in T_T} b_{ft} q_{ft} \end{aligned} \quad (1)$$

A função objetivo do presente modelo é composta por cinco termos cuja soma resultam no VPL ao fim do horizonte de planejamento.

No primeiro termo, computa-se o retorno financeiro no início do horizonte de planejamento obtido com a unidade de manejo  $i$ , caso ela tenha sido colhida no período  $t$ . Os demais termos da função objetivo estão relacionados à custos de transporte e operação. O segundo termo computa os custos relacionados à operação de colheita florestal. O terceiro e quarto termos representam custos relacionados ao transporte de madeira, sendo que o terceiro termo representa o custo de transporte do talhão  $i$  para a unidade fabril florestal no período  $t$ , enquanto o quarto termo faz alusão aos custos relacionados ao frete de entrega com origem no talhão  $i$  do sortimento  $l$  demandado pelo cliente  $j$  no período  $t$ . Como pressuposto do modelo define-se que os custos de transporte em ambos os termos descritos não variam de acordo com o sortimento  $l$  transportado, e que apenas uma unidade produtora é abastecida no planejamento. E por fim, o quinto termo diz respeito aos custos de uma eventual compra de madeira de processo do fornecedor  $f$  para suprir a demanda da fábrica no período  $t$ .

A função objetivo do modelo está sujeita às seguintes restrições:

O talhão  $i$  deve ser colhido ao menos uma vez ao longo do horizonte de planejamento (equação 2).

$$\sum_{t \in T} x_{it} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

Para garantir o equilíbrio de volume colhido entre os períodos evitando desta forma grandes flutuações no suprimento de madeira ao longo do horizonte de planejamento três pares de restrição adaptados de Troncoso et al. (2015) são inseridos ao modelo.

O primeiro par de restrições (equações 3 e 4) está presente para que não ocorram grandes variações de volume colhido entre períodos vizinhos. Compara-se o período corrente e o período seguinte.

Estes grupos de restrições são válidos tanto para os períodos táticos quanto estratégicos, com exceção do último período de cada conjunto, para que se garanta que a comparação entre os volumes colhidos ocorra dentro de um mesmo espaço temporal. No modelo adota-se que não deve haver uma variação maior que 10% do volume colhido entre um período e outro.

$$\sum_i s_{it} x_{it} \geq a_t^- \sum_i s_{i,t+1} x_{i,t+1} \quad t \in T: t \neq t_{n_T}^T; t \neq t_{n_E}^E \quad (3)$$

$$\sum_i s_{it} x_{it} \leq a_t^+ \sum_i s_{i,t+1} x_{i,t+1} \quad t \in T: t \neq t_{n_T}^T; t \neq t_{n_E}^E \quad (4)$$

Já os pares de restrições de volume (inequações 5 e 6, 7 e 8) realizam o equilíbrio entre o que é colhido nos períodos táticos e o primeiro período estratégico. Faz-se através destes pares, a ligação entre os diferentes períodos de planejamento de maneira flexível, diferentemente do proposto por Troncoso et al. (2015). Em sua pesquisa os autores trabalharam com intervalos temporais simétricos, ou seja, a soma de todos os períodos táticos era equivalente a um período estratégico.

O primeiro par (inequações 5 e 6) torna-se ativo caso um período estratégico seja menor que o somatório dos períodos táticos. Este par compara o volume colhido no primeiro período estratégico com a soma dos períodos imediatamente anteriores a ele, de tal forma que, seu somatório seja equivalente a um período estratégico do problema. O segundo par (inequações 7 e 8) torna-

se válido caso um período estratégico tenha a mesma dimensão temporal da soma de todos os períodos táticos, ou caso seja superior a ela.

$$y \left( \sum_i \sum_{t_1^E - l_{t_E}}^{t_{n_T}^T} s_{it} x_{it} \geq a_{t_{n_T}^T}^- \sum_i s_{i,t_1^E} x_{i,t_1^E} \right) \quad (5)$$

$$y \left( \sum_i \sum_{t_1^E - l_{t_E}}^{t_{n_T}^T} s_{it} x_{it} \leq a_{t_{n_T}^T}^+ \sum_i s_{i,t_1^E} x_{i,t_1^E} \right) \quad (6)$$

$$z \left( \frac{l_{t_E}}{\sum l_{t_T}} \left( \sum_i \sum_{t \in T_T} s_{it} x_{it} \right) \geq a_{t_{n_T}^T}^- \sum_i s_{i,t_1^E} x_{i,t_1^E} \right) \quad (7)$$

$$z \left( \frac{l_{t_E}}{\sum l_{t_T}} \left( \sum_i \sum_{t \in T_T} s_{it} x_{it} \right) \leq a_{t_{n_T}^T}^+ \sum_i s_{i,t_1^E} x_{i,t_1^E} \right) \quad (8)$$

O conjunto de restrições 9 garante que apenas talhões que estejam dentro do intervalo de idade permitido para derrubada sejam colhidos no período  $t$ .

$$\sum_t \sum_{i \in I_t^1} x_{it} = 0 \quad (9)$$

A restrição 10 garante que agrupamentos de talhões que excedam a área máxima de corte permitida não sejam colhidos no mesmo período, de acordo com a formulação ARM.

Nesta restrição garante-se que a soma dos talhões colhidos pertencentes a um determinado cluster deve ser inferior ao número total de talhões do grupo menos 1, ou seja, ao menos um talhão deverá não ser colhido mantendo desta forma a certeza de que a área máxima imposta não será violada.

$$\sum_{i \in \lambda(i)} x_{it} \leq r(i) - 1 \quad \forall t, \lambda(i) \quad (10)$$



A restrição 11 garante que a capacidade de colheita disponível no período será respeitada.

$$\sum_i s_{it} x_{it} \leq g_t \quad \forall t \quad (11)$$

O equilíbrio de fluxo entre o que é colhido no talhão  $i$  do sortimento  $l$ , o que é transportado para a fábrica e a madeira disponível para clientes e outros fins, é garantida pela restrição 12.

$$\sum_l k_{ilt} + \sum_l q_{ilt}^1 = \sum_l x_{it} s_{ilt}^0 \quad \forall i, t \in T \quad (12)$$

A inequação 13 garante o equilíbrio de fluxo entre o que não foi transportado para a fábrica e a madeira vendida para terceiros.

$$k_{it} \geq \sum_j q_{lijt}^2 \quad \forall i, l, t \in T_T \quad (13)$$

A restrição 14 garante que a demanda da fábrica será atendida.

$$\sum_i \sum_l q_{ilt}^1 + \sum_f \sum_l q_{flt} \geq \sum_l D_{lt} \quad \forall t \in T_T \quad (14)$$

A restrição 15 garante que os contratos firmados com clientes serão atendidos. O parâmetro  $\gamma_j$  indica qual a porcentagem mínima de serviço de abastecimento firmada em contrato entre o cliente  $j$  e a unidade fabril.

$$\sum_i q_{lijt}^2 \geq \gamma_j d_{jlt} \quad \forall j, l, t \in T_T \quad (15)$$

A restrição 16 garante que a capacidade de abastecimento de madeira de processo do fornecedor  $f$  não será excedida.

$$q_{ft} \leq M_{ft} \quad \forall t \in T_T \quad (16)$$

$$x_{it}, y, z \in \{0,1\} \quad (17)$$

$$q_{ilt}^1, q_{ijlt}^2, q_{ft}, k_{ilt} \geq 0 \quad (18)$$

Por fim, os conjuntos de restrições 17 e 18 garantem a integralidade e não negatividade das variáveis presentes no modelo.

O modelo proposto foi implementado na linguagem C++ utilizando a tecnologia *Concert* e otimizado via CPLEX© 12.10.0. Para a realização dos testes computacionais utilizou-se um computador com processador Intel® Core™ i5-4210U, 1.7 GHz com 8 GB de memória RAM, em um sistema de 64 bits.

## 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.3.1 Testes computacionais

Nesta seção faz-se, respectivamente a definição das instâncias propostas para avaliação do modelo, bem como os resultados obtidos a partir dos testes computacionais.

#### 4.1.1 Descrição dos cenários

A fim de avaliar o comportamento do modelo 21 cenários foram propostos (Tabela 4-1). O horizonte de planejamento adotado para todos os cenários, como descrito em sessões anteriores, foi de 15 anos, sendo 5 períodos de 1 ano, seguidos de dois períodos de 5 anos cada, totalizando 7 períodos ao final.

Os 21 cenários foram ser divididos em sete subgrupos, por suas características. Cada subgrupo é formado por um cenário sem adjacência e dois cenários com restrição de área. O primeiro grupo de cenários (cenários LsA, L90A e L150A), avalia uma formulação reduzida do modelo, em que estão inativos os conjuntos de restrições 3 e 4, de controle da variação do volume colhido entre períodos de igual dimensão e os conjuntos 5 e 6, que têm por objetivo manter equilibrados o volume colhido nos cinco primeiros períodos do horizonte de planejamento e do primeiro período estratégico. O cenário LsA, além de ter inativo os quatro grupos de restrições mencionados também não possui em sua formulação a restrição, responsável pelo controle da adjacência, enquanto o cenário L90A possui como limitação a formação de áreas contíguas de até 90 ha e o cenário L150A de 150 ha.

Os cenários DsA10, D90A10, e D150A10 incluem as restrições 3 e 4, permitindo a variação de até 10% no volume colhido entre períodos de mesmo tamanho. Os dois últimos cenários do grupo incluem a restrição ARM, como limitando a colheita de áreas superiores a 90 hectares e 150 hectares. A inclusão de todas as restrições de controle de volume, permitindo a variação de até 10%

entre períodos de mesma dimensão e entre fronteiras foi feita nos cenários CsA10, C90A10 e C150A10, incluindo aos últimos a restrição de adjacência.

A mesma lógica foi aplicada na construção dos demais cenários, modificando-se a variação de volume permitida entre cenários. Desta forma os cenários DsA15, D90A15 e D150A15 não controlam o volume entre a fronteira do horizonte de planejamento, mas impõem que entre períodos iguais a variação de volume colhido não ultrapasse 15%. Os cenários CsA15, C90A15 e C150A15 incluem todas as restrições do modelo e controlam a flutuação de volume em 15%, a exceção está no cenário CsA15 que não inclui a restrição de adjacência.

Por fim tem-se os dois últimos grupos de cenários. O primeiro é formado pelos cenários DsA20, D90A20 e D150A20 que fazem o controle do volume colhido em períodos de mesmo tamanho em 20% e permitem a livre variação de volume na fronteira. O último grupo, faz o controle total da variação de volume em 20% é composto pelos cenários CsA20, C90A20 e C150A20.

TABELA 4-1 – CENÁRIOS AVALIADOS

Cenário	Nome	Subgrupo	Sigla	Variação de volume (%)	Restrições inativas
1	Livre sem adjacência	1	LsA	10	3,4,5,6,8
2	Livre 90 ha		L90A		3,4,5,6
3	Livre 150 ha		L150A		3,4,5,6
4	Desequilíbrio fronteira sem adjacência	2	DsA10	10	5,6,8
5	Desequilíbrio fronteira 90 ha		D90A10	10	5,6
6	Desequilíbrio fronteira 150 ha		D150A10	10	5,6
7	Completo sem adjacência	3	CsA10	10	8
8	Completo 90 ha		C90A10	10	
9	Completo 150 ha		C150A10	10	

continua

Cenário	Nome	Subgrupo	Sigla	Variação de volume (%)	Restrições inativas
10	Desequilíbrio fronteira sem adjacência	4	DsA15	15	5,6,8
11	Desequilíbrio fronteira 90 ha		D90A15	15	5,6
12	Desequilíbrio fronteira 150 ha		D150A15	15	5,6
13	Completo sem adjacência	5	CsA15	15	8
14	Completo 90 ha		C90A15	15	
15	Completo 150 ha		C150A15	15	
16	Desequilíbrio fronteira sem adjacência	6	DsA20	20	5,6,8
17	Desequilíbrio fronteira 90 ha		D90A20	20	5,6
18	Desequilíbrio fronteira 150 ha		D150A20	20	5,6
19	Completo sem adjacência	7	CsA20	20	8
20	Completo 90 ha		C90A20	20	
21	Completo 150 ha		C150A20	20	

FONTE: A AUTORA (2020).

#### 4.1.2 Resultados computacionais

Um dos impeditivos de problemas com restrições de adjacência é o grande número de variáveis com o aumento da área máxima de corte permitida. Nesta pesquisa optou-se pela estratégia de se analisar apenas talhões com idade de corte dentro do intervalo permitido para a criação dos clusters. Desta forma o padrão da floresta se modifica a cada iteração, alterando as áreas máximas vizinhas em cada período. Isto pode ser observado com a redução do número de restrições entre os modelos com 90 hectares de área máxima e 150 hectares de área máxima (Tabela 4-2). O modelo encontrou áreas contínuas, passíveis de corte, que excedessem 150 hectares em um menor número de

períodos em comparação à 90 hectares. Este fato, a redução no número de combinações possíveis e de talhões avaliados na função recursiva fez com que o tempo computacional demandado não fosse dispendioso.

TABELA 4-2 – NÚMERO DE RESTRIÇÕES POR CENÁRIO.

<b>Cenário</b>	<b>Subgrupo</b>	<b>Sigla</b>	<b>Restrições</b>
1		LsA	4904
2	1	L90A	5856
3		L150A	5608
4		DsA10	4914
5	2	D90A10	5866
6		D150A10	5618
7		CsA10	4916
8	3	C90A10	5868
9		C150A10	5620
10		DsA15	4914
11	4	D90A15	5866
12		D150A15	5618
13		CsA15	4916
14	5	C90A15	5868
15		C150A15	5620
16		DsA20	4914
17	6	D90A20	5866
18		D150A20	5618
19		CsA20	4916
20	7	C90A20	5868
21		C150A20	5620

FONTE: A AUTORA (2020).

Os resultados computacionais de tempo e para o VPL obtidos nos testes realizados encontram-se na Tabela 4-3.

TABELA 4-3 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS OBTIDOS PARA OS 21 CENÁRIOS AVALIADOS.

Cenário	Subgrupo	Sigla	VPL	Tempo (s)
1	1	LsA	R\$ 40.635.680,83	8,03
2		L90A	R\$ 40.431.827,10	131,77
3		L150A	R\$ 40.558.298,80	136,49
4	2	DsA10	R\$ 40.069.642,70	15,11
5		D90A10	R\$ 40.069.102,01	141,47
6		D150A10	R\$ 40.069.923,07	163,66
7	3	CsA10	R\$ 34.368.745,02	24,48
8		C90A10	R\$ 34.351.634,97	155,97
9		C150A10	R\$ 34.368.098,78	163,16
10	4	DsA15	R\$ 40.106.477,94	22,28
11		D90A15	R\$ 40.106.122,87	176,38
12		D150A15	R\$ 40.106.629,99	159,98
13	5	CsA15	R\$ 35.399.980,70	12,33
14		C90A15	R\$ 35.394.493,23	142,41
15		C150A15	R\$ 35.400.035,47	164,15
16	6	DsA20	R\$ 40.144.582,08	19,80
17		D90A20	R\$ 40.139.367,59	180,42
18		D150A20	R\$ 40.145.069,74	156,06
19	7	CsA20	R\$ 36.350.985,62	3,95
20		C90A20	R\$ 36.349.081,49	105,72
21		C150A20	R\$ 36.349.927,91	108,48

FONTE: A AUTORA (2020).

O modelo apresentado, em todas as variações propostas, alcançou o valor ótimo com baixo tempo de processamento. Observa-se que todos os cenários em que a restrição de adjacência foi retirada do modelo o tempo de processamento foi reduzido drasticamente, chegando ao valor mínimo de 3,95 segundos para o cenário CsA20. O subgrupo 7, do qual o cenário CsA20 faz parte, foi o que apresentou os menores tempos para a execução dos modelos com a inclusão da limitação da colheita de áreas que excedam um determinado valor, com 105,72 segundos para o cenário C90A20, e 108,48 segundos para o cenário C150A20. O subgrupo 7 possui todas as restrições em sua formulação, com a permissão de uma variação de  $\pm 20\%$  do volume colhido entre períodos e fronteira. Com relação ao valor ótimo alcançado, o maior valor observado foi o do cenário LsA. Resultado semelhante foi observado por Augustynczik (2014),

comparando o VPL obtido por um cenário sem restrições de adjacência e sem controle do volume colhido e os demais cenários por ele testado. A aplicação da restrição ARM de 90 hectares e controle da variação de volume em 10% entre períodos e fronteira causou o maior impacto sobre o VPL. Na Tabela 4-4 apresenta-se a comparação entre os tempos de execução dos cenários.

TABELA 4-4 – COMPARAÇÃO ENTRE O TEMPO DE EXECUÇÃO DOS CENÁRIOS.

Cenário	Subgrupo	Sigla	Tempo (s)	Aumento tempo em relação ao cenário LsA	Aumento em relação ao cenário sem adjacência do subgrupo
1		LsA	8,03		
2	1	L90A	131,77	16,41	16,41
3		L150A	136,49	16,99	16,99
4		DsA10	15,11	1,88	
5	2	D90A10	141,47	17,62	9,36
6		D150A10	163,66	20,38	10,83
7		CsA10	24,48	3,05	
8	3	C90A10	155,97	19,42	6,37
9		C150A10	163,16	20,32	6,66
10		DsA15	22,28	2,77	
11	4	D90A15	176,38	21,96	7,92
12		D150A15	159,98	19,92	7,18
13		CsA15	12,33	1,54	
14	5	C90A15	142,41	17,73	11,55
15		C150A15	164,15	20,44	13,31
16		DsA20	19,80	2,46	
17	6	D90A20	180,42	22,46	9,11
18		D150A20	156,06	19,43	7,88
19		CsA20	3,95	0,49	
20	7	C90A20	105,72	13,16	26,74
21		C150A20	108,48	13,51	27,44

FONTE: A AUTORA (2020).

Comparando o tempo de execução dos cenários (Tabela 4-4), uma vez que este parâmetro pode vir a se tornar um impeditivo da resolução do problema, posto que os tempos de solução podem aumentar exponencialmente em função do número de restrições e variáveis do problema (TÓTH et al., 2013a), observa-se que o cenário D90A20 foi o que resultou em maior incremento, levando um



tempo 22,46 vezes superior de execução em relação ao cenário LsA. Em termos médios, os cenários com adjacência do subgrupo 6 tiveram o maior aumento de tempo em comparação ao LsA, sendo 20,95 vezes mais dispendiosos em termos de tempo. A inclusão das restrições de equilíbrio aos cenários sem adjacência não gerou grande impacto em relação ao tempo em comparação ao modelo LsA, sendo que o cenário CsA20 foi mais rapidamente processado, levando o equivalente à metade do tempo de execução do cenário LsA.

Analisando os subgrupos, os cenários C90A20 e C150A20, que previamente haviam obtido melhor desempenho em relação ao tempo de processamento de modelos com adjacência, foram os que tiveram maiores incrementos de tempo em relação ao cenário sem adjacência de seu subgrupo, neste caso o cenário CsA20. Ambos os cenários tiveram um incremento superior a 25 vezes o tempo de resolução de seus equivalentes sem adjacência. Com exceção dos subgrupos 2 e 3, com variação de volume de 10%, os demais subgrupos apresentaram comportamento semelhante, com o incremento de tempo em relação ao seu cenário sem adjacência se elevando com a inclusão das restrições de equilíbrio de volume na fronteira.

A Tabela 4-5 sintetiza resultados em relação ao VPL obtido. A análise ocorre tendo por base o valor do VPL obtido para o cenário 1, LsA e dentro dos grupos, em relação ao seu cenário sem adjacência.

TABELA 4-5 – VARIAÇÃO DO VPL ENCONTRADO EM RELAÇÃO AO CENÁRIO LSA E EM RELAÇÃO AOS CENÁRIOS SEM ADJACÊNCIA DOS SUBGRUPOS.

Cenário	Subgrupo	Sigla	VPL	Variação do VPL em relação ao cenário LsA (%)	Variação do VPL em relação ao cenário sem adjacência do subgrupo
1		LsA	R\$ 40.635.680,83		
2	1	L90A	R\$ 40.431.827,10	-0,50%	-0,50%
3		L150A	R\$ 40.558.298,80	-0,19%	-0,19%
4		DsA10	R\$ 40.069.642,70	-1,41%	
5	2	D90A10	R\$ 40.069.102,01	-141%	0,00%
6		D150A10	R\$ 40.069.923,07	-1,41%	0,00%

Continua

Cenário	Subgrupo	Sigla	VPL	Variação do VPL em relação ao cenário LsA (%)	Variação do VPL em relação ao cenário sem adjacência do subgrupo
7	3	CsA10	R\$ 34.368.745,02	-18,23%	
8		C90A10	R\$ 34.351.634,97	-18,29%	-0,05%
9		C150A10	R\$ 34.368.098,78	-18,24%	0,00%
10	4	DsA15	R\$ 40.106.477,94	-1,32%	
11		D90A15	R\$ 40.106.122,87	-1,32%	0,00%
12		D150A15	R\$ 40.106.629,99	-1,32%	0,00%
13	5	CsA15	R\$ 35.399.980,70	-14,79%	
14		C90A15	R\$ 35.394.493,23	-14,81%	-0,02%
15		C150A15	R\$ 35.400.035,47	-14,79%	0,00%
16	6	DsA20	R\$ 40.144.582,08	-1,22%	
17		D90A20	R\$ 40.139.367,59	-1,24%	-0,01%
18		D150A20	R\$ 40.145.069,74	-1,22%	0,00%
19	7	CsA20	R\$ 36.350.985,62	-11,79%	
20		C90A20	R\$ 36.349.081,49	-11,79%	-0,01%
21		C150A20	R\$ 36.349.927,91	-11,79%	0,00%

Fonte: A autora (2020).

Os resultados apresentados na Tabela 4-5 demonstram que o maior impacto ao VPL, para o modelo proposto, tem origem na inclusão das restrições de equilíbrio de volume, tendo redução de até 18,29% ao se comparar o cenário C90A10 com o cenário LsA. Observa-se que as reduções do VPL obtidas nos cenários sem controle do volume colhido entre a fronteira, em relação ao cenário CsA, foram significativamente menores quando comparadas às diminuições observadas para o modelo completo. Binoti et al. (2012) observaram redução no VPL média de 8% com a inclusão de restrições de adjacência em seu modelo.

Borges et al. (2015) compararam os resultados obtidos por quatro modelos aplicados à uma região de 15538 ha. O primeiro modelo, sem restrições (Nc), impõe que apenas um tratamento seja designado para cada talhão. O modelo dois promove o controle do volume colhido (Ch), não permitindo a flutuação do volume colhido entre períodos maior que um determinado limite. O terceiro modelo (ChOg) é uma extensão do segundo, impondo além do controle

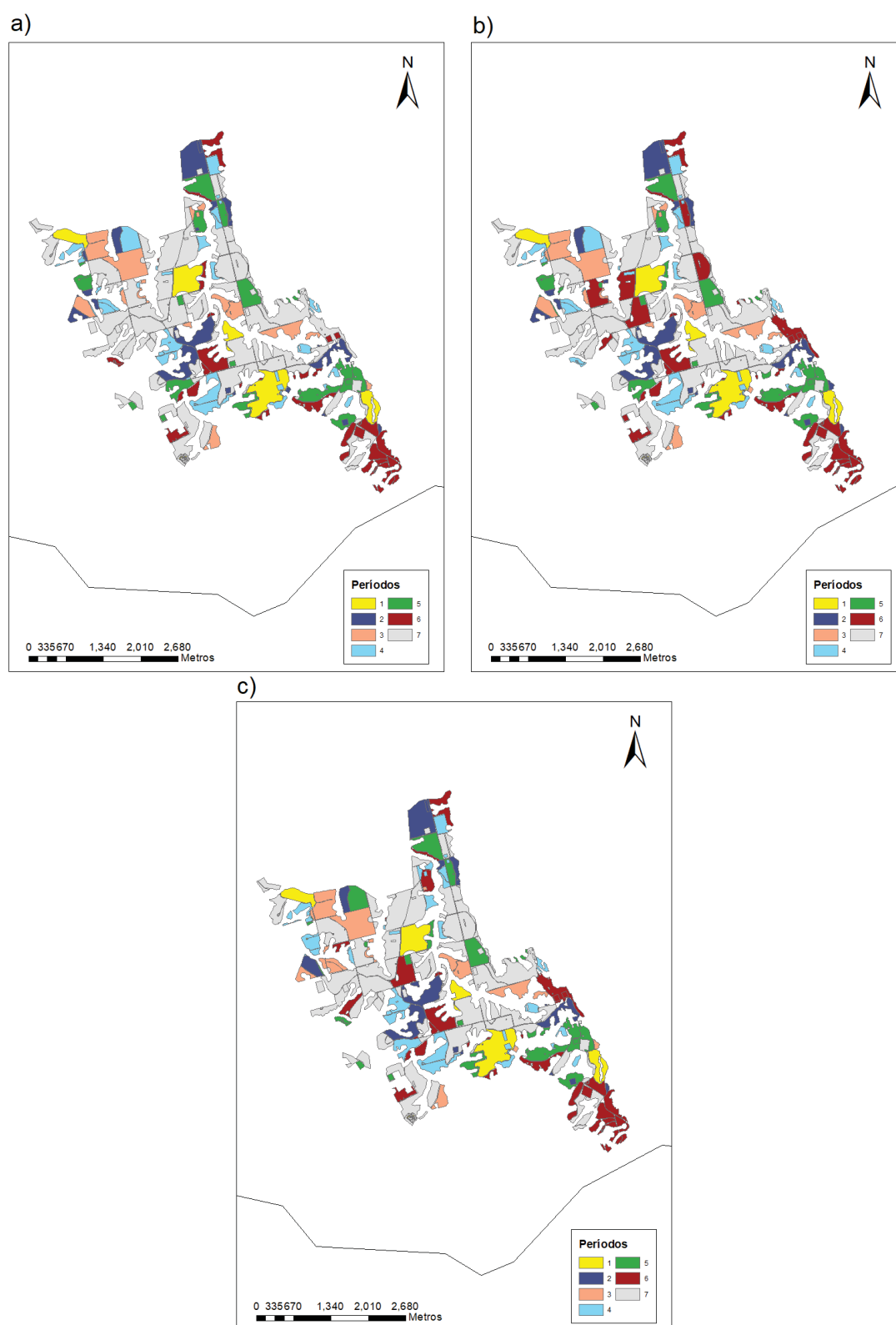
do fluxo de volume de madeira, a existência de uma porcentagem mínima de floresta de maior idade em todos os períodos. O último modelo (ChOgOa) além das restrições incluídas nos modelos 2 e 3 possui restrições de área máxima (ARM). A inclusão da restrição de adjacência (modelo 4) causou a redução do VPL em 7% em relação aos modelos 3 e 2, e quando comparado ao modelo sem restrições (Nc) o modelo ChOgOa teve uma redução de 21,8% no VPL.

Analisando os subgrupos, isto é, cenários que possuem características mais semelhantes, a redução no VPL não é tão intensa ao se contrapor os resultados obtidos com a execução do modelo com a restrição ARM e do modelo sem restrição de adjacência. O subgrupo 1, em que a variação do volume não possui um limitante, é o que apresenta maiores variações, sendo a maior redução do VPL a do cenário L90A, em relação ao seu par sem adjacência, LsA, de 0,5%. O aumento da área de corte contígua permitida levou a uma diminuição da diferença entre o VPL, fazendo com que o cenário L150A tivesse uma redução de 0,19%. Entre os demais subgrupos houve uma redução ainda maior da diferença entre o cenário sem adjacência e os cenários com adjacência. O subgrupo 2 (controle do volume em 10%, sem controle na fronteira) e o subgrupo 4 (controle do volume em 15%, sem controle na fronteira) não tiveram impacto no VPL com a inclusão das restrições de adjacência. Os demais subgrupos não apresentaram variação entre o cenário sem adjacência e os cenários com limitação de área igual a 150 hectares. No entanto os cenários C90A10, C90A15, D90A20 e C90A20 apresentaram leve variação, sendo a maior encontrada para o cenário mais restritivo C90A10, em comparação com seu par sem adjacência, CsA10. Augustynczyk (2014) observou comportamento semelhante ao comparar cenários de características próximas, com redução de 0,02% do VPL entre um cenário com restrição ARM de 50 ha e equilíbrio de volume de 10% e seu equivalente sem adjacência e 0,01% para o cenário com restrição ARM de 60 ha e equilíbrio de volume.

A Figura 4-5 apresenta o agendamento gerado para os cenários LsA, L90A e L150A. Observa-se a formação de duas grandes áreas contíguas colhidas durante o período 7 no cenário LsA, uma totalizando 198,53 hectares e a segunda 164,86 hectares. Estas grandes áreas colhidas geram um pico de colheita no último período do horizonte de planejamento (Figura 4-6),

provocando uma diferença de 80,83% no volume colhido entre os períodos 6 e 7. Observa-se também que o volume colhido no período 6, para o mesmo cenário, foi semelhante aos volumes colhidos nos períodos de 1 a 5, causando um desbalanceamento na fronteira entre horizontes de 366%. Com a inserção das restrições de adjacência este desequilíbrio foi suavizado, passando para 73,20% entre os períodos 6 e 7 e 260% entre a fronteira no cenário L150A, e para 65,61% entre os períodos estratégicos e 201% entre a fronteira do cenário L90A. A maior área contígua colhida para o modelo L150A foi de 149,85 hectares, no sétimo período. No cenário L90A três áreas contíguas de maior dimensão foram formadas, também no sétimo período, com 77,89 hectares, 71,75 hectares e 81,17 hectares.

FIGURA 4-5 – AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA O LSA (a), L90A (b) E L150A (c).



FONTE: A AUTORA (2020).

FIGURA 4-6 – VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 1.



FONTE: A AUTORA (2020).

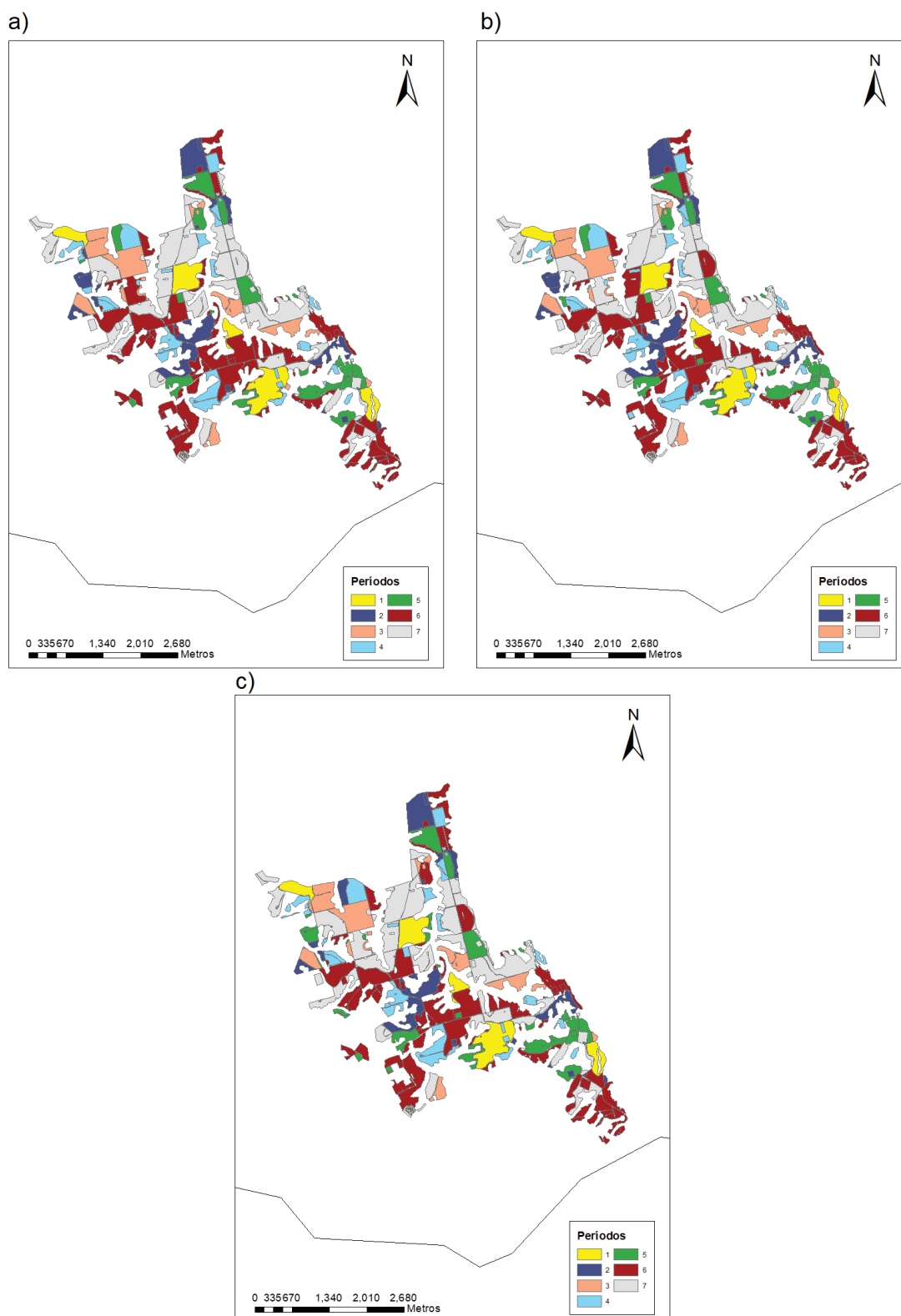
A Figura 4-7 apresenta o agendamento gerado para os cenários DsA10, D90A10 e D150A10. Nestes cenários houve a inclusão das restrições de flutuação de volume, de até 10% para mais ou para menos, entre períodos de igual dimensão. Observa-se que o comportamento entre os cenários deste subgrupo convergiu para um comportamento mais próximo. Traz-se à memória que não houve redução do VPL para os cenários com adjacência deste subgrupo em comparação ao cenário DsA10.

As maiores áreas contíguas para o cenário DsA10 foram obtidas no sexto período com 79,88 ha e 79,80 ha e no sétimo período com 93,60 hectares e 91,57 hectares. O cenário D90A10 distribuiu suas maiores áreas conectadas nos períodos seis e sete, com a formação de três conjuntos superiores, o primeiro pertencente ao período 6, com 66,11 hectares, e os demais no último período com 68,19 hectares e 81,17 hectares. O último cenário deste subgrupo gerou duas grandes áreas conectadas no sétimo período, com 116,60 ha e 81,17 ha.

O agendamento de colheita para o cenário D150A10 gerou um incremento de 0,03% no volume colhido de madeira ao longo do horizonte de planejamento

em relação ao cenário DsA10. O grande desequilíbrio observado entre os períodos 6 e 7 para o subgrupo anterior não é mais visto nestes cenários graças à inclusão das restrições de volume (Figura 4-8). A diferença entre o volume colhido nos períodos 6 e 7 para os três cenários teve média de 9,96%, dentro do limite imposto. O desequilíbrio entre a fronteira dos horizontes foi suavizado, mas se manteve presente, com uma diferença de 71,94% entre o volume colhido nos cinco primeiros períodos e o sexto período do cenário DsA10, 71,82% para o cenário D90A10 e 71,92% para o cenário D150A. Assim como no subgrupo anterior o cenário de maior restrição de área foi o que obteve a menor variação de volume.

FIGURA 4-7 - AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA O DSA10 (a), D90A10 (b) E D150A10 (c).



FONTE: A AUTORA (2020).



FIGURA 4-8 - VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 2.



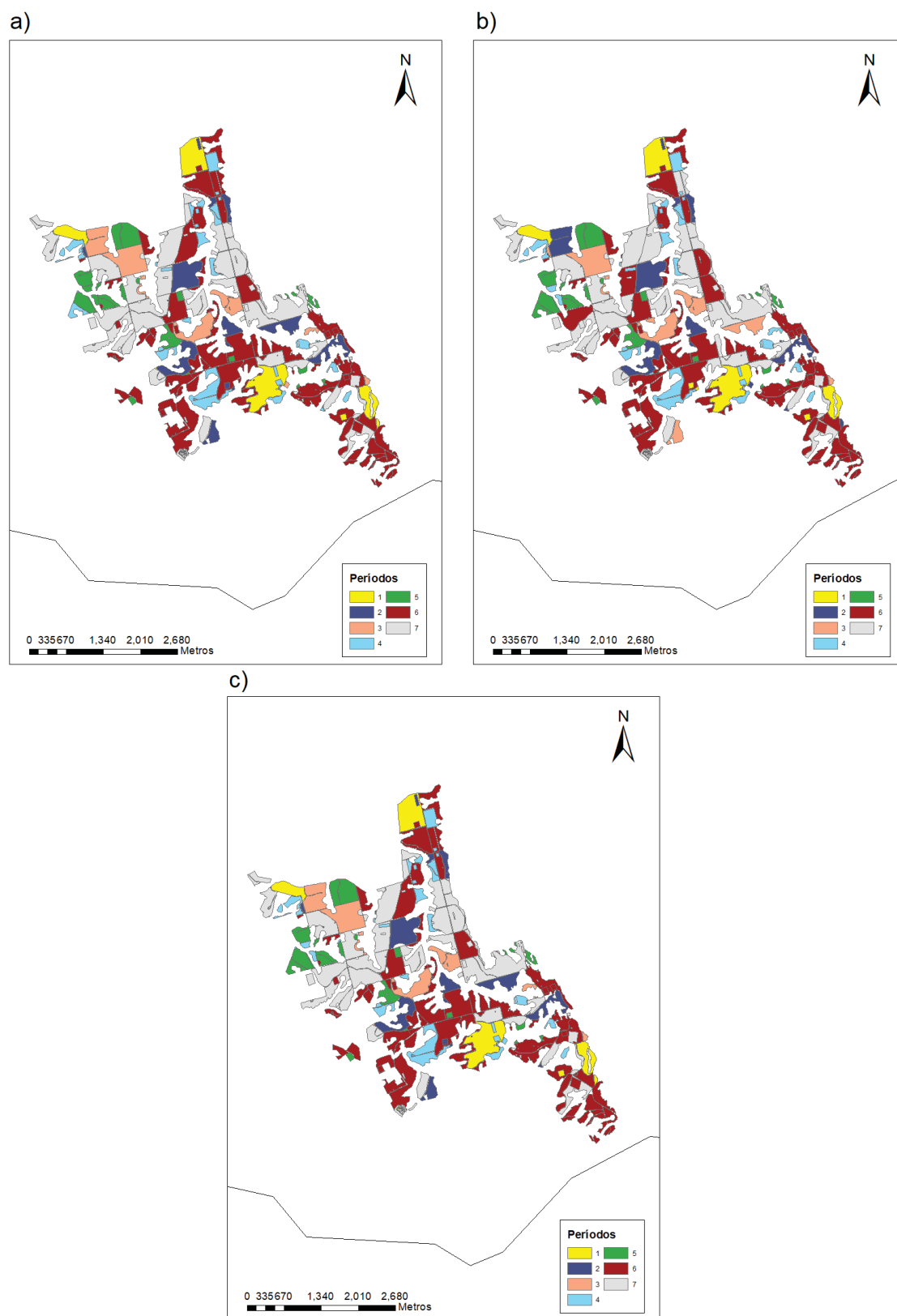
FONTE: A AUTORA (2020).

A Figura 4-9 apresenta o agendamento gerado para os cenários CsA10, C90A10 e C150A10, em que foi feita a inclusão das restrições de flutuação de volume, de até 10% para mais ou para menos, também para a fronteira entre o horizonte tático e o estratégico. Observa-se que os cenários com área máxima de 150 hectares e sem adjacência tiveram comportamentos semelhantes. Em termos de volume (Figura 4-10) não houve diferença significativa entre estes cenários. As maiores áreas contíguas colhidas para o cenário CsA10 foram obtidas no sexto período com 88,06 ha e no sétimo período com 92 hectares e 140,02 hectares. Já o cenário C150A10 criou uma grande área conectada de 93,35 no sexto período e de 101,44 ha e 140,86 ha no sétimo período. O último cenário discutido deste subgrupo, C90A10, gerou área máxima colhida de 73,70 ha no sexto período e áreas contíguas colhidas de 81,59 ha e 83,83 ha para o sétimo período.

O agendamento de colheita para este subgrupo foi o que obteve a menor redução de volume em relação ao cenário LsA, com uma diminuição média de 1.45%, mesmo sendo o mais conservador com relação a variações de volume. A inclusão da restrição de equilíbrio de fronteira gerou uma mudança no

comportamento no volume colhido nos últimos períodos, havendo a inversão do pico de volume colhido do período sete para o período 6. Este fato fez com que o desequilíbrio encontrado na fronteira não fosse mais observado.

FIGURA 4-9 - AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA O CSA10 (a), C90A10 (b) E C150A10 (c).



FONTE: A AUTORA (2020).

FIGURA 4-10 - VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 3.



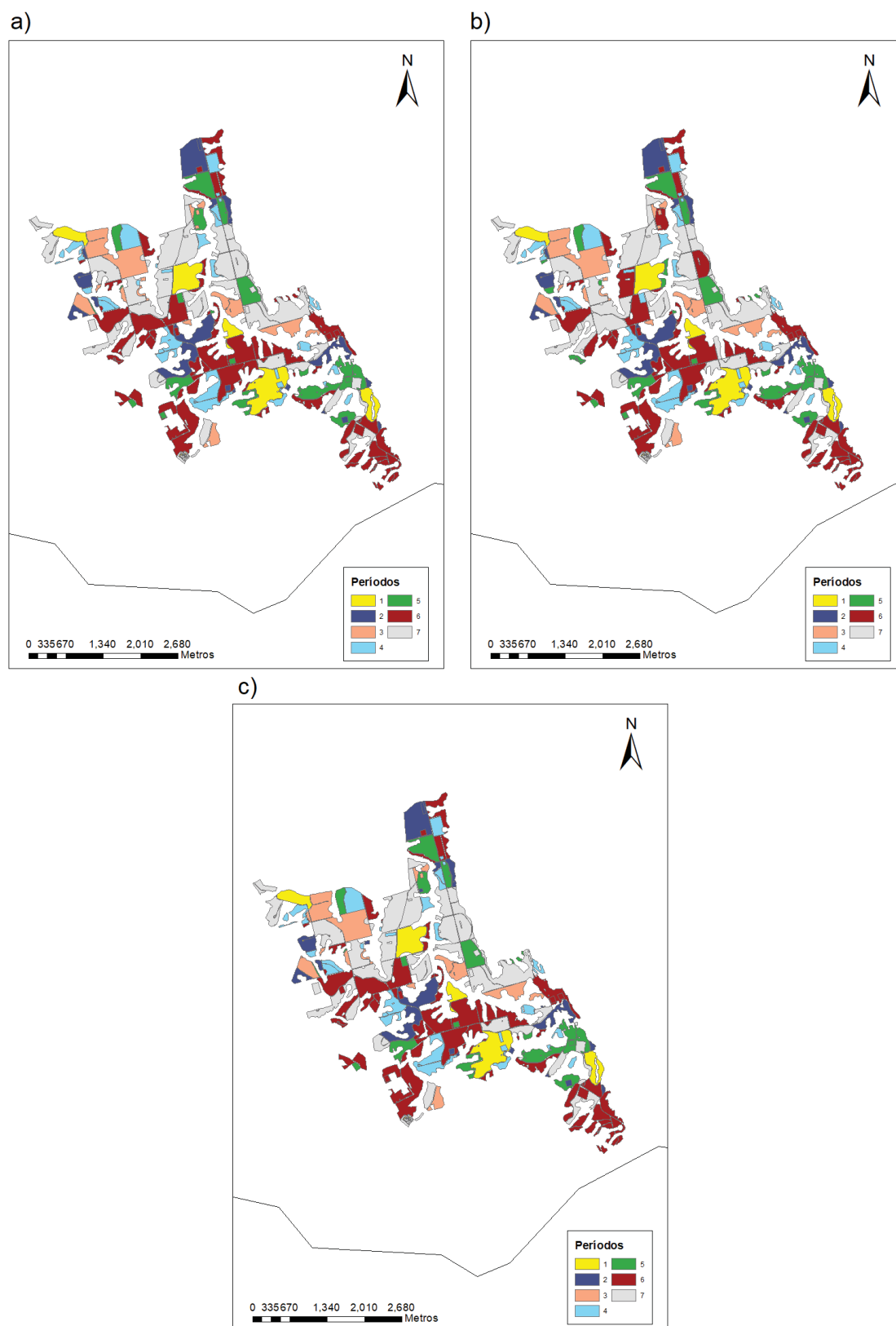
FONTE: A AUTORA (2020).

A Figura 4-11 apresenta o agendamento gerado para os cenários DsA15, D90A15 e D150A15. Nestes cenários permite-se que haja a variação de até 15% para mais ou para menos, entre períodos de igual dimensão.

As maiores áreas contíguas para o cenário DsA15 foram obtidas no sétimo período com 91,57 ha e 123,16 ha. O cenário mais restritivo deste subgrupo formou área conectadas de 78,40 hectares e 70,41 hectares para o sétimo período. O cenário D150A10 para o mesmo período formou áreas contíguas de 92 hectares e de 122,03 hectares.

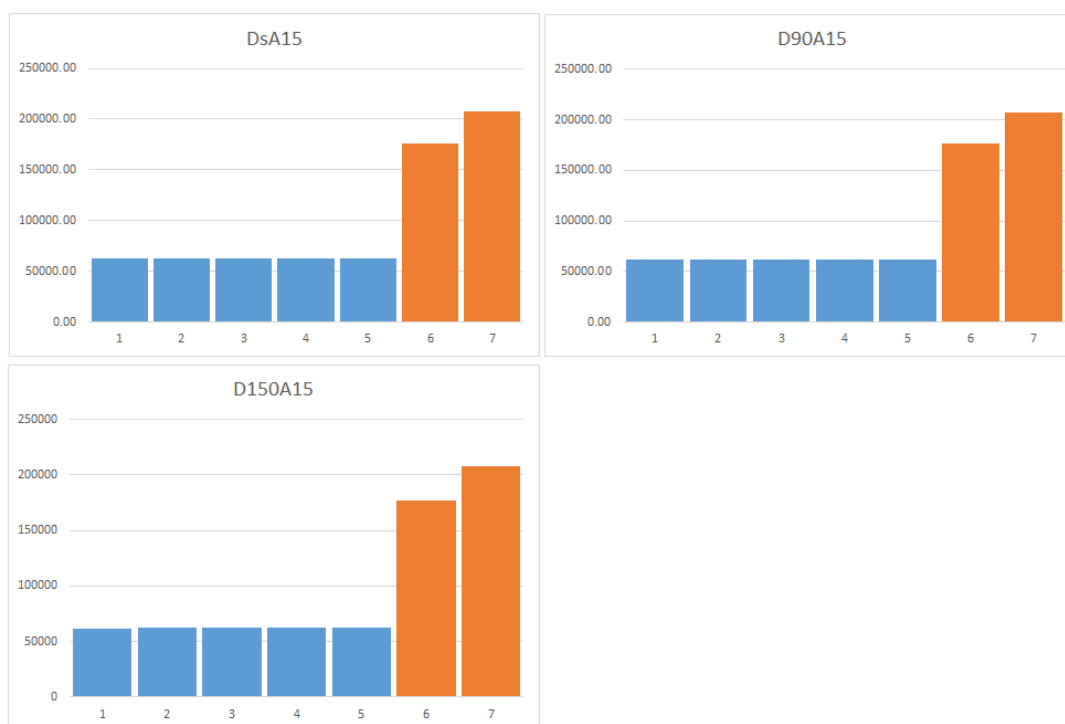
A limitação de 15% de variação no volume entre períodos de mesma dimensão (Figura 4-12) gerou um desequilíbrio médio entre as fronteiras superior aos cenários sem restrição de volume, de 76% frente a 73,21% gerados pelos cenários livres. Comparando os cenários deste subgrupo ao LsA a variação de 15% permitida foi a que gerou a maior redução no volume total colhido ao fim do horizonte de planejamento, com uma queda média de 4,54%.

FIGURA 4-11 - AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA DSA15 (a), D90A15 (b) E D150A15 (c).



FONTE: A AUTORA (2020).

FIGURA 4-12 - VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 4.



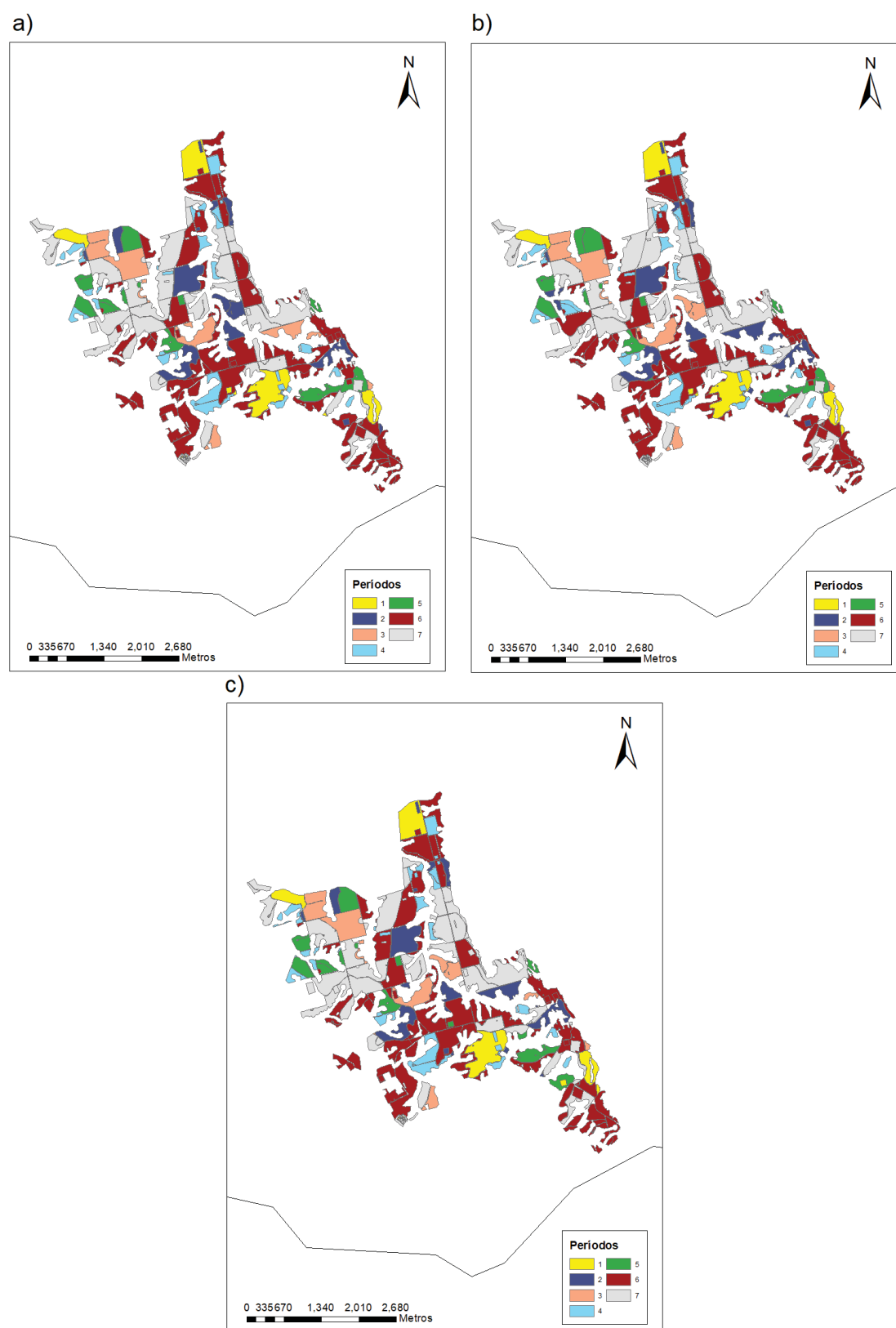
FONTE: A AUTORA (2020).

A Figura 4-13 apresenta o agendamento gerado para os cenários CsA15, C90A15 e C150A15. Neles controla-se também a variação de volume entre a fronteira dos horizontes tático e estratégico, em 15%. Observa-se neste subgrupo que os cenários com restrição de adjacência tiveram comportamentos semelhantes. As maiores áreas contíguas colhidas para o cenário C90A15 foram obtidas no sexto período com 69.39 ha e no sétimo período com 81,60 hectares e 73,28 hectares. Já o cenário C150A15 criou áreas conectadas de 88,31 hectares no sexto período e de 95,53 ha e 92 ha no sétimo período. Já o cenário sem adjacência, CsA15, gerou áreas máxima de 69.63 ha no sexto período e áreas de 81,17 ha e 135,74 ha para o sétimo período.

Assim como os cenários completos com limitante de 10% na variação de volume, ao se comparar com o cenário LsA, os cenários completos de 15% tiveram melhor desempenho em relação ao volume colhido que os cenários sem o controle de volume na fronteira. Estes cenários obtiveram redução média de 2,33%, enquanto o subgrupo com restrição de volume entre períodos iguais de 15% e sem controle na fronteira obteve redução média de 4,54%. O mesmo comportamento observado no subgrupo 3 entre os períodos 6 e 7 e de

decrescimento no volume colhido nos períodos táticos pôde ser observado no subgrupo 5 (Figura 4-14).

FIGURA 4-13 - AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA CSA15 (a), C90A15 (b) E C150A15 (c).



FONTE: A AUTORA (2020).



FIGURA 4-14 - VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 5.

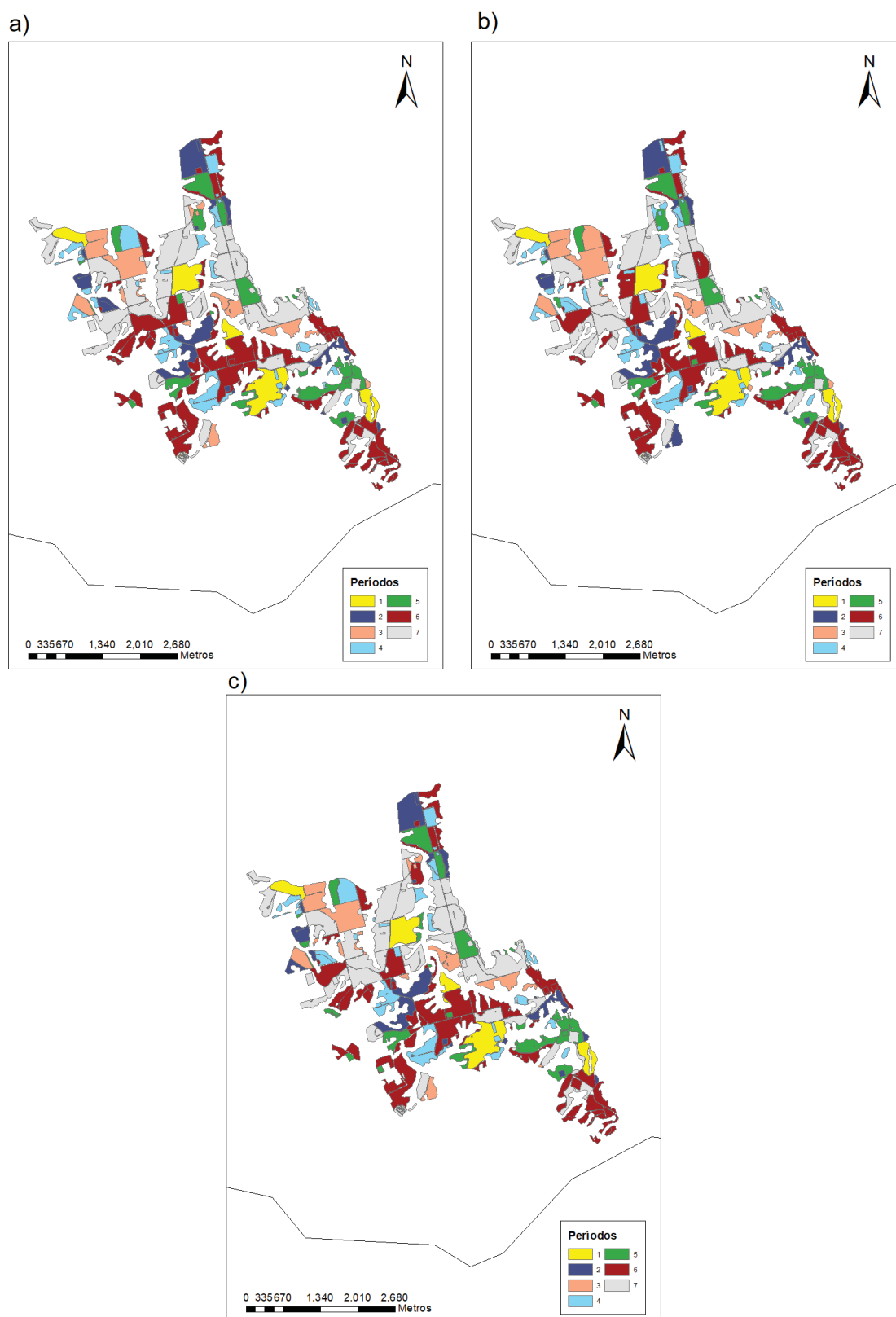


FONTE: A AUTORA (2020).

A Figura 4-15 apresenta o agendamento gerado para os cenários DsA20, D90A20 e D150A20. Através dela pode-se observar o comportamento semelhante entre os cenários sem adjacência e com limitação de 150 hectares. Houve a formação de duas grandes áreas contíguas colhida durante o período 7 no cenário DsA20. A primeira com 95,05 hectares e a segunda de 134,54 hectares. O cenário D150A20 gerou assim como o DsA20, duas grandes áreas conectadas, ambas no sétimo período. A maior com 132,25 hectares, e a segunda com 92,00 ha. No cenário D90A20 três áreas contíguas de maior dimensão foram formadas, a primeira no sexto período, com 59,50 hectares, e no sétimo período, 81,17 hectares e 87,73 hectares.

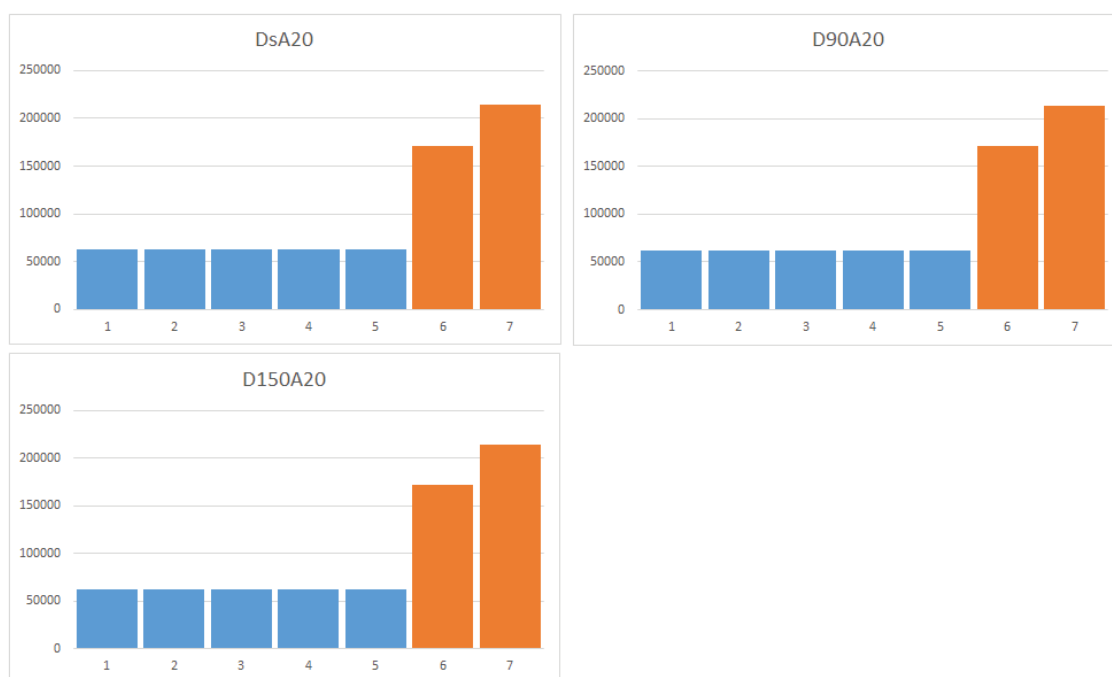
O incremento na variação do volume entre períodos de mesma dimensão (Figura 4-16) fez com que o desequilíbrio médio entre as fronteiras fosse superior ao obtido nos cenários do subgrupo 4, com variação média de 82%, a maior dentre todos os subgrupos. Observa-se que assim como os demais subgrupos sem controle na fronteira o período sete obteve o maior volume colhido.

FIGURA 4-15 - AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA DSA20 (a), D90A20 (b) E D150A20 (c).



FONTE: A AUTORA (2020).

FIGURA 4-16 - VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 6.

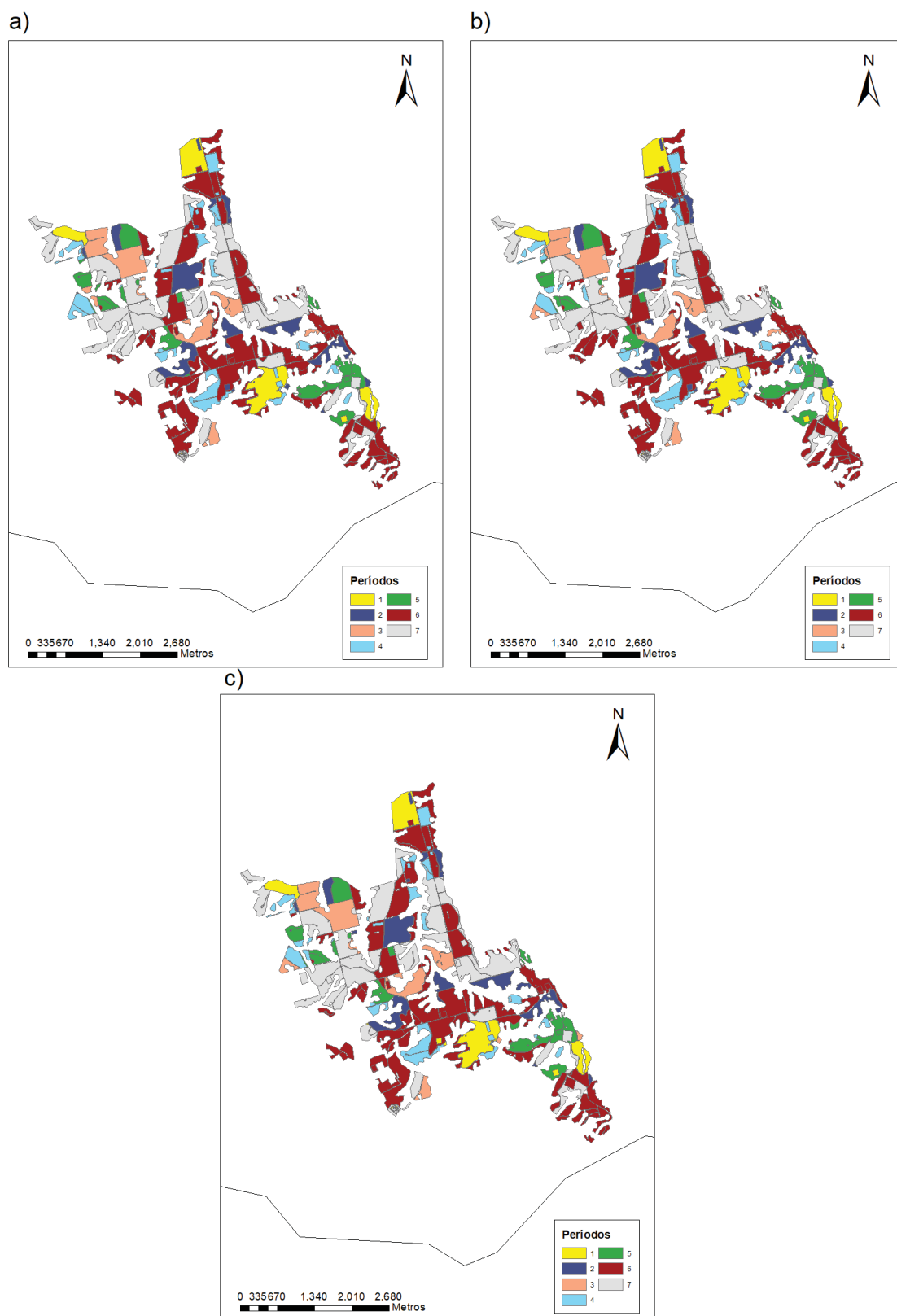


FONTE: A AUTORA (2020).

A Figura 4-17 apresenta o agendamento gerado para os cenários CsA20, C90A20 e C150A20. Observa-se neste subgrupo que as maiores áreas contíguas colhidas pelos cenários menos restritivos (CsA20 e C150A20) foram no período 6, ao invés do período 7. A maior área colhida para o cenário CsA20 foi de 114,83 ha. Já o cenário C150A20 criou uma área de 113,73 hectares no sexto período. O cenário com limite de 90 hectares, C90A20, possuiu comportamento semelhante aos demais cenários, com as maiores áreas colhidas no sétimo período, 81,57 hectares e 88,98 hectares.

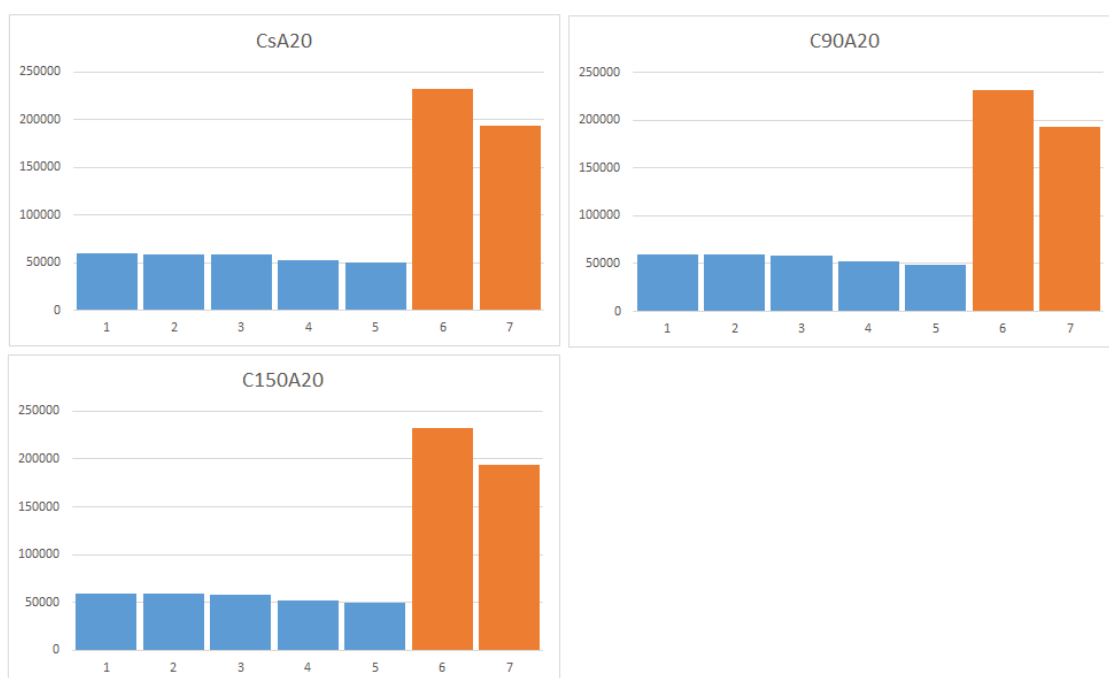
A diferença entre a redução no volume colhido (Figura 4-18), em comparação ao cenário LsA, para os cenários do subgrupo 6 e o subgrupo 7 foi menor que os demais pares de subgrupos. O subgrupo 6, com controle de volume de 20% entre períodos de mesma dimensão teve redução média de 4,24% em relação ao cenário LsA. Em contra ponto o subgrupo 7 teve seu volume reduzido em 3,17% em média.

FIGURA 4-17 - AGENDAMENTO GERADO PELO MODELO PROPOSTO PARA O CSA20 (a), C90A20 (b) E C150A20 (c).



FONTE: A AUTORA (2020).

FIGURA 4-18 - VOLUME DE COLHEITA NOS CENÁRIOS DO SUBGRUPO 7.



FONTE: A AUTORA (2020).

De forma geral, os impactos causados pela inclusão da restrição de adjacência foram aceitáveis, uma vez que dentro dos subgrupos a redução no valor presente líquido por ela gerada foi baixa. Assim como observado Könnyu e Tóth (2013) e Tóth et al. 2013b, os resultados obtidos por esta pesquisa demonstraram que quanto maior a área máxima de colheita permitida melhores as respostas alcançadas pelo modelo, em termos de VPL.

#### 4.4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pelos testes realizados nesta tese demonstraram que ao se comparar os demais cenários ao cenário LsA (livre e sem adjacência) todos apresentam redução no VPL. Todavia, uma análise mais detalhada dos modelos, unindo-os em subgrupos semelhantes, ou seja, comparando modelos de mesma característica, os cenários incluindo restrições de adjacência apresentam pouca variação ao serem confrontados com o cenário sem adjacência de seu subgrupo. Para os cenários em que são incluídas as restrições de volume e cuja limitação de área máxima de corte imposta foi de 150 hectares, o comportamento obtido foi muito semelhante aos cenários sem adjacência. Os cenários de adjacência mais restritiva, de 90 hectares, obtiveram redução média de 0,08% em relação aos seus pares sem adjacência.

Com relação ao volume colhido, os cenários mais restritivos, subgrupo 3, apresentou a menor redução de volume de madeira em comparação ao cenário LsA. Os cenários sem controle do volume da fronteira apresentaram maior redução do volume colhido frente ao cenário LsA. Com o aumento permitido da variação de volume a diferença entre os cenários com controle de volume de fronteira e sem foi sendo reduzido. O volume colhido nos períodos táticos não foi afetado com a inclusão da restrição de equilíbrio de volume entre períodos de igual dimensão pois durante este período o modelo foi forçado a atender às demandas da indústria e clientes, gerando um volume colhido semelhante entre os períodos. A restrição de adjacência mais restritiva, de 90 hectares, foi capaz de gerar uma leve suavização no desequilíbrio do volume.

Ainda sobre os resultados obtidos, a estratégia de se analisar apenas talhões com idade de corte dentro do intervalo permitido para a criação dos clusters viabilizou a resolução dos cenários em um baixo tempo computacional. Isto fez com que o número de restrições não aumentasse com o incremento do limite da área máxima de corte. Além disso a adaptação da restrição proposta por Troncoso et al. 2015 tornou possível a flexibilização da análise de períodos heterogêneos no horizonte de planejamento.

#### 4.4.1 Recomendações

A partir do estudo realizado, em que decisões sobre colheita, abastecimento, transportes e restrições de adjacência com períodos de diferentes dimensões são incluídos em um só modelo, surgem apontamentos interessantes para futuros trabalhos.

Este modelo foi aplicado para apenas uma base de dados, faz-se a sugestão de aplicá-lo à diferentes cenários, baseados em dados reais e através da geração de grids teóricos. Sugere-se também a avaliação do desempenho do modelo em instâncias de maior dimensão.

Neste trabalho considerou-se que as restrições de adjacência possuem a mesma limitação independente da dimensão do período. Sugere-se que sejam utilizadas áreas máximas diferentes para os períodos táticos e períodos estratégicos. Além disso, utilizou-se o Modelo Tipo I como base para a modelagem matemática do problema de planejamento, sugere-se avaliação dos impactos de se utilizar o Modelo Tipo II como estratégia de modelagem.

## REFERÊNCIAS

- ACUNA, M. Timber and biomass transport optimization: A review of planning issues, solution techniques and decision support tools. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 38, n. 2, p. 279-290, 2017.
- AUGUSTYNICZIK, A. L. D. **Planejamento florestal otimizado considerando áreas mínimas e máximas operacionais de colheita**. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BINOTI, D. H. B et al. Regulation of even-aged forest with adjacency constraints. **Forest Policy and Economics**, v. 20, p. 49-57, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.02.009>
- BORGES, P. et al. Impact of maximum opening area constraints on profitability and biomass availability in forestry-a large, real world case. **Silva Fennica**, v. 49, n. 5, p. 1-21, 2015 doi: <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1347>
- BORGES, P.; BERGSENG, E.; EID, T. Adjacency constraints in forestry-a simulated annealing approach comparing different candidate solution generators. **Mathematical & Computational Forestry & Natural Resource Sciences**, v. 6, n. 1, 2014.
- D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 46, n. 4, p. 265-281, 2008. doi: <https://doi.org/10.3138/infor.46.4.265>
- ESRI. ArcGIS® - ArcMap™ Version 10.4.1. United States of America, 2016.
- ESRI. **Polygon Neighbors (Analysis)**. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/analysis/polygon-neighbors.htm>. Acesso em: 07 jul. 2020.



GOYCOOLEA, M. et al. Evaluating approaches for solving the area restriction model in harvest scheduling. **Forest Science**, v. 55, n. 2, p. 149-165, 2009. doi: <https://doi.org/10.1093/forestscience/55.2.149>

KÖNNYŰ, N.; TÓTH, S. F. A cutting plane method for solving harvest scheduling models with area restrictions. **European Journal of Operational Research**, 228(1), 236-248, 2013. doi: 10.1016/j.ejor.2013.01.020

LOPES, Eduardo da Silva et al. Compactação de um Solo Submetido ao Tráfego do Harvester e do Forwarder na Colheita de Madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 223-230, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.046413>.

MCDILL, M. E.; REBAIN, S. A.; BRAZE, J. Harvest scheduling with area-based adjacency constraints. **Forest Science**, v. 48, n. 4, p. 631-642, 2002. doi: <https://doi.org/10.1093/forestscience/48.4.631>

RÖNNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical programming**, v. 97, n. 1-2, p. 267-284, 2003. doi: <https://doi.org/10.1007/s10107-003-0444-0>

SPIECKER, H. **Métodos da Pesquisa Operacional com Aplicações em Manejo Florestal**. Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 1975.

THOMPSON, E.F.; HALTERMAN, B.G.; LYON, T.J.; MILLER, R.L. Integrating timber and wildlife management planning. **The Forestry Chronicle**, v. 49, n. 6, p. 247-250, 1973

TÓTH, S. F. et al. ECOSEL: Multi-objective optimization to sell forest ecosystem services. **Forest Policy and Economics**, v. 35, p. 73-82, 2013b. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.06.011>

TÓTH, S. F. et al. Testing the use of lazy constraints in solving area-based adjacency formulations of harvest scheduling models. **Forest Science**, v. 59, n. 2, p. 157-176, 2013a. doi: <https://doi.org/10.5849/forsci.11-040>

TRONCOSO, J. et al. A mixed integer programming model to evaluate integrating strategies in the forest value chain—a case study in the Chilean forest industry. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 45, n. 7, p. 937-949, 2015.

VAHID, S. et al. Supply chain modelling frameworks for forest products industry: a systematic literature review. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 54, n. 1, p. 52-75, 2016.

WEINTRAUB, A., et al. Handbook of Operations Research in Natural Resources. New York: Springer Science, 2007.

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P. A new optimization model for spatially constrained harvest scheduling under area restrictions through maximum flow problem. **Forest Science**, v. 64, n. 4, p. 392-406, 2018. doi: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxy006>









166	8	28	93	97	167	168
167	8	28	166			
168	93	166				
169	23	50	66	72	88	128

Talhão	Vizinhos						
170	42	138	149				
171	4	42	127	149			
172	15	16					
173	35	182					
174	11						
175	15						
176	15						
177	15	165					
178	15	165					
179	23						
180	23						
181	72						
182	11	12	13	20	35	36	173